МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ



INTERSTELLAR
COMMUNICATION

A Collection of Reprints
and Original Contributions

A. G. W. Cameron, Editor

Institute for Space Studies
Goddard Space Flight Center, NASA

W. A. Benjamin, Inc.
New York — Amsterdam
1963

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ

Перевод с английского

С предисловием
Л. М. Гиндилиса

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР». МОСКВА 1965

УДК 523.07

«Много ли обществ, состоящих из разумных существ, находится в нашей Галактике, и есть ли надежда вступить с ними в связь?»

Этими вопросами открывается сборник статей под редакцией известного астрофизика А. Дж. У. Камерона. Авторы статей, крупные астрономы, физики и биологи, подробно рассматривают интереснейшие проблемы науки — существование внеземных цивилизаций и возможности связи с ними при помощи современной техники. Исключительно интересны статьи, в которых рассматриваются проблемы межзвездных полетов.

Книга рассчитана на широкий круг лиц, интересующихся новейшими достижениями науки.

Редакция космических исследований, астрономии и геофизики

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Происхождение и развитие разумной жизни во Вселенной — одна из величайших проблем естествознания, которая издавна волновала наиболее пытливые умы человечества. За последние годы интерес к этой проблеме заметно возрос. В научной литературе все чаще обсуждается проблема установления контактов с внеземными цивилизациями. На эту тему появляется все большее число серьезных научных работ, в исследования вовлекается все большее число специалистов: астрономов, математиков, биологов, физиков. Этот процесс, по-видимому, не случаен.

Несомненно, начало космической эры наложило глубокий отпечаток на образ мышления людей, заставило иначе взглянуть на некоторые вопросы и выдвинуло на первый план в качестве серьезных научных задач такие, которые еще недавно относились к сфере фантастики.

С другой стороны, успехи астрономии и биологии дают возможность научного подхода к проблеме множественности обитаемых миров. В настоящее время получены серьезные аргументы в пользу многочисленности планетных систем в Галактике. Достижения радиофизики и радиотехники за последние десятилетия, в частности создание крупных радиотелескопов и появление квантовых усили-

телей (мазеров), привели к тому, что уже сейчас в принципе можно обеспечить космическую дальность связи. Возникшая совсем недавно радиоастрономия накопила богатый опыт обнаружения и анализа источников космического радиоизлучения. Наконец, развитие кибернетики дает средства для изучения общих закономерностей передачи и приема информации от внеземных цивилизаций, для объективного анализа кодированных сигналов и разработки вопросов космической лингвистики на основе общей теории языка и теории дешифровки.

Если до последнего времени задача установления связи с внеземными цивилизациями была технически невыполнима, то теперь имеются реальные предпосылки для постановки исследований и опытов в этом направлении. Первой попыткой такого рода был знаменитый проект «Озма», о котором рассказывается в статье Дрейка.

Все эти обстоятельства так или иначе стимулировали появление сборника статей «Межзвездная связь» под редакцией известного американского астрофизика А. Дж. У. Камерона, перевод которого на русский язык предлагается вниманию читателей.

Цель сборника и его содержание достаточно полно раскрыты в предисловии Камерона, и поэтому вряд ли будет уместно повторять их. Отметим лишь то новое, что произошло в этой области после выхода в свет американского издания сборника.

Прежде всего следует отметить выход в свет книги И. С. Шкловского «Вселенная, жизнь, разум», посвященной современным представлениям о строении и развитии Вселенной, о происхождении и распространенности жизни и о способах установления контактов с внеземными цивилизациями. В настоящее время готовится к выходу второе издание этой книги, дополненное и переработанное автором.

Принципиально новый подход к проблеме поиска сигналов от внеземных цивилизаций был предложен Н. С. Кардашевым, который проанализировал вопрос о способах передачи информации внеземными цивилизациями (Астрономический журнал, **41**, вып. 2, 1964). Он же высказал смелую идею о том, что некоторые из известных источников космического радиоизлучения могут оказаться искусственными, и указал на ожидаемые свойства искусственных источников космического радиоизлучения.

В мае 1964 г. в Бюракане состоялось организованное Астрономическим Советом Академии Наук СССР, Государственным Астрономическим институтом им. П. К. Штернберга и Бюраканской астрофизической обсерваторией Академии Наук Армянской ССР всесоюзное совещание, посвященное обсуждению проблемы внеземных цивилизаций и возможности установления контакта с ними. Совещание пришло к выводу, что проблема установления связи с внеземными цивилизациями является вполне назревшей, актуальной научной проблемой, и наметило пути экспериментальных исследований по поиску сигналов внеземных цивилизаций. В настоящее время Издательство Академии Наук Армянской ССР готовит издание трудов этого совещания.

* * *

Сборник печатается с небольшими сокращениями. В русском издании опущена статья И. С. Шкловского, перепечатанная из журнала «Природа», № 7, 1960 г., а также статья Моррисона «Межзвездная связь».

Перевод выполнен сотрудниками Государственного Астрономического института им. П. К. Штернберга В. И. Слышем, Г. Б. Шоломицким, Т. А. Лозинской и В. С. Аведисовой.

Л. М. Гиндилис.

1 ВВЕДЕНИЕ

Эта книга — научная антология, в которой представлены наиболее значительные статьи, касающиеся, быть может, крупнейшей проблемы современного научного мировоззрения. Эта проблема может быть сформулирована следующим образом: как много технически развитых цивилизаций существует в нашей Галактике и как нам связаться с ними? Можно сказать проще: где существует еще кто-нибудь?

Всего несколько лет назад мы были склонны думать, что мы — единственные во Вселенной. Считалось, что образование солнечной системы явилось следствием исключительно редкого явления — тесного сближения двух звезд. Однако затем укрепилась тенденция считать образование планетных систем обычным явлением, сопровождающим процесс звездообразования. Мы начали также считать, что самопроизвольное зарождение жизни является естественным и нормальным актом на первобытной планете с составом, подобным земному, и с благоприятной температурой. Таким образом, мы завершаем начатую Коперником интеллектуальную революцию и допускаем не только возможность того, что мы — не единственные во Вселенной, но и возможность существования в одной нашей Галактике миллионов цивилизаций, более развитых, чем наша. Если теперь нам удастся сделать следующий шаг и наладить связь с некоторыми из этих цивилизаций, мы можем ожидать небывалого обогащения всех областей нашей науки и искусства.

Этим дискуссиям положил начало Шепли своей книгой «Звезды и люди». Пытаясь ответить на вопрос: одиноки ли мы во Вселенной?— он придерживается исключительно осторожных взглядов на возможность существования жизни во Вселенной и делает ряд простых расчетов. Предположим, что только одна звезда из тысячи имеет планетную систему, что только в одной из тысячи этих планетных систем существует планета, расположенная на подходящем расстоянии, температура на которой благоприятствует поддержанию жизни, что только одна из тысячи таких планет достаточно велика, чтобы удержать атмосферу; наконец, что только одна из тысячи планетных атмосфер имеет подходящий химический состав. Тогда лишь у одной из 10^{12} звезд будут подходящие условия для зарождения жизни. Но поскольку в наблюдаемой области Вселенной более 10^{20} звезд, мы можем ожидать, что вблизи 10^{8} звезд разовьется жизнь.

В настоящее время мы стали менее осторожны в предположениях и считаем, что звезд с развитой жизнью гораздо больше. Но теперь мы ставим новый вопрос: на скольких из этих звезд жизнь достигла стадий высокоразвитой цивилизации, с которой мы можем связаться? Оценки в этой области приведены в конце книги.

В первых разделах книги рассматривается ряд основных вопросов, необходимых для того, чтобы определить место и значимость проблемы, которую мы намереваемся рассмотреть. Сюда относятся излагаемые мной вопросы истории Галактики, происхождения солнечной системы и истории Земли. Затем Мелвин Кальвин рассматривает химическую эволюцию на Земле, приводящую к зарождению жизни и первым шагам ее эволюции.

В разделах 6—9 Су-Шу Хуанг рассматривает условия во Вселенной, при которых планеты становятся пригодными для жизни. В разделе 10 я также касаюсь этого же предмета.

В разделах 11 и 12 Дайсон рассматривает те виды активной деятельности, которые может вести высокоразвитая цивилизация. С точки зрения обсуждаемой проблемы это интересно потому, что в результате предполагаемой активности разумных существ в окрестностях звезды могут произойти также изменения, которые

достаточны для обнаружения цивилизации при наблюдении этих изменений.

В разделе 13 в живой, вдохновляющей лекции Парселл приводит ряд причин, по которым межзвездные путешествия не могут служить приемлемым способом межзвездных связей. Парселл отдает предпочтение сигнализации посредством радиоволн. Хорнер в разделе 14 продолжает опровержение мифа о межзвездных путешествиях.

Раздел 15 — это важная пионерская работа Джузеппе Коккони и Филипа Моррисона, в которой они количественно анализируют проблему межзвездной связи при помощи радиоволн. Коккони и Моррисон предлагают в качестве естественной частоты, благоприятной для межзвездной сигнализации, длину волны излучения межзвездного водорода 21 *см*.

В разделе 16 Дрейк рассказывает, каким образом он намеревается получить сигнал на волне 21 *см* от двух звезд, по типу похожих на Солнце и находящихся на расстоянии 11 световых лет — τ Кита и ε Эридана. Раздел 17 представляет собой краткий отчет об отрицательных результатах его работы. Дрейк не упоминает о фантастическом событии, которое произошло во время этой попытки. Он наблюдал в течение многих дней первый подозреваемый источник, звезду ε Эридана, и ничего не обнаружил. Тогда он перешел к звезде τ Кита и в течение полутора минут после поворота антенны принимал сильные уверенные сигналы. Можете представить себе его волнение, когда он услышал отчетливый разумный сигнал! Но по мере того как антенна сопровождала источник, сигнал постепенно исчез. Дрейк вынужден был заключить, что принимал земной сигнал. Звезда τ Кита не давала ничего, и в течение дня или двух сильное излучение от нее ни разу не повторилось.

Уэбб, Голей, Брейсуэлл и Су-Шу Хуанг продолжают рассмотрение вопроса о межзвездных связях в разделах 18—21.

В разделах 22 и 23 Оливер, Шварц и Таунс выясняют возможность межзвездной сигнализации при помощи лазеров. Интересно заметить, что создание этого прибора только в недавнее время, а не ранее является исто-

рической случайностью. Вероятно, некоторые развитые цивилизации рассматривают лазеры как многообещающее средство связи.

В разделах 24 и 25 Брейсуэлл излагает интересные соображения о возможности посылки межзвездных зондов для исследования ближайших звезд. Эти зонды, обращаясь вокруг звезд, будут дожидаться развития цивилизации и установят первый контакт с этими новыми цивилизациями.

В последующих разделах рассматриваются более широкие вопросы, связанные с возможностью существования развитых обществ в пределах нашей Галактики.

В разделе 26 Хорнер делает количественные оценки расстояния до ближайших цивилизаций. Он учитывает возможное значение межзвездных связей как средства удлинения времени жизни культуры.

В разделе 27 Оливер вновь рассматривает вопрос о технике космической связи и практически демонстрирует целесообразность посылки телевизионных сигналов в качестве наиболее предпочтительной формы межзвездных сообщений.

Наконец, в разделах 28 и 29 я сделал несколько замечаний относительно будущих исследований межзвездных связей. Я рассмотрел вероятности различных факторов, связанных с этой проблемой. В заключение Филип Моррисон также сделал ряд замечаний о будущих исследованиях в этой области.

Большая часть материала книги относится к специальным вопросам. Тем не менее и читатель-неспециалист прочтет ее с пользой для себя. Я предложил бы вниманию такого читателя разделы 1—7, 11, 13, 16, 17, 21, 24, 25, 27—29.

Подбирая материал для этого сборника, я столкнулся с тем, что статьи разных авторов частично повторяют друг друга. Выбросить повторяющиеся места было бы несправедливо по отношению к тем авторам, статьи которых печатаются здесь впервые, и при этом книга не на много уменьшилась бы в объеме.

В области межзвездной связи в настоящее время выполняется много ценных исследований. Я надеюсь, что появление настоящего сборника будет стимулировать новые

исследования. Эти работы будут осуществляться в самых разнообразных направлениях и публиковаться во множестве различных журналов. Возможно, что публикование последующих сборников, подобных данному, будет способствовать широкому ознакомлению с результатами исследований специалистов разных направлений. Поэтому я хотел бы предложить, чтобы авторы посылали мне копии своих трудов для опубликования в сборниках по вопросам межзвездных связей.

А. Дж. У. Камерон

2 ИСТОРИЯ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

Изучение строения других галактик во многих отношениях оказывается делом более простым, чем определение структуры нашей Галактики. Из-за того что мы погружены в нашу собственную Галактику и окружены облаками поглощающего межзвездного газа и пыли, многие из наиболее интересных областей Галактики недоступны для нас. В частности, целиком скрыта от нас область вокруг галактического центра. Поскольку светимость звезд меняется в широком диапазоне, структурные особенности нашей Галактики выявляются с большим трудом.

Только в последние годы, с развитием радиоастрономии, мы обрели возможность составить картину распределения межзвездного водорода и тем самым построить более или менее точную модель Галактики.

Разнообразие структурных особенностей галактик исключительно велико. Некоторые галактики почти полностью состоят из звезд и имеют сферическую или эллипсоидальную форму. Другие содержат значительное количество газа — несколько процентов общей массы галактики, и этот газ обычно концентрируется в плоском, относительно тонком диске. Бóльшая часть звезд в таких галактиках также обнаруживает концентрацию к плоскости; такие звезды, очевидно, образовались уже после того, как газ локализовался в плоском диске. Эти галактики называются «спиральными»— термин, отражающий концентрацию газа и ярких звезд внутри диска в спиральные ветви. Существует еще один вид галактик, у которых примерно половина массы находится в несконденсированном виде. Поскольку эти галактики не обладают столь высокой степенью уплощенности или регулярности, они называются «нерегулярными». По-видимому, наша Галактика является довольно типичной спиральной галактикой.

Характеристики звезд в нашей Галактике также исключительно разнообразны. В последние годы наметился существенный прогресс в понимании большинства наблюдаемых типов звезд как последующих стадий звездной эволюции. Разные типы звезд часто имеют совершенно различное распределение внутри Галактики. Это различие дает нам в руки ключ, с помощью которого можно попытаться определить возраст и историю развития нашей Галактики. Самые старые звезды в Галактике образуют так называемое «население сферической составляющей». Распределение этих звезд почти сферически симметрично относительно центра Галактики, их орбиты выделяются большими радиальными скоростями. Поскольку Солнце движется по почти круговой орбите, у звезд сферической составляющей, в окрестностях Солнца, как правило, наблюдаются большие скорости относительно Солнца. У звезд сферической составляющей в большинстве случаев наблюдается недостаточное обилие тяжелых элементов относительно водорода по сравнению с Солнцем. В отдельных случаях наблюдается различие в 100 раз и более.

Звезды, сформировавшиеся позднее, обнаруживают значительную концентрацию к галактической плоскости. Их орбиты приближаются к круговым. Обилие тяжелых элементов в этих звездах сравнимо с солнечным; самые молодые звезды могут быть обогащены тяжелыми элементами больше, чем Солнце.

Эти различия в химическом составе становятся понятными в свете современной теории образования элементов. В процессе эволюции внутренние области звезды становятся постепенно все горячее и плотнее. В течение наиболее длинного периода активной жизни звезды источником энергии является превращение водорода в гелий в результате термоядерных реакций. Водород является самым распространенным элементом во Вселенной, и в резуль-

тате этой термоядерной реакции освобождается больше энергии, чем в результате всех последующих. После истощения водорода во внутренних областях звезды при дальнейшем повышении температуры выгорает гелий, при этом образуются углерод и кислород, которые в свою очередь последовательно выгорают при еще более высоких температурах. В конце концов вещество внутри звезды в основном превращается в железо и дальнейшее освобождение ядерной энергии становится невозможным. Однако разогревание во внутренних областях продолжается, и в звезде происходит взрыв, сопровождающийся колоссальным освобождением энергии и сбрасыванием оболочки. Это эффектное явление носит название «вспышки сверхновой».

Все эти ядерные реакции происходят с теми же ядрами, которые мы находим на Земле, и в метеоритах, причем продукты реакций образуются в приблизительно тех же самых относительных количествах. Поэтому представляется вероятным, что когда-то Галактика состояла в значительной степени или даже полностью из водорода. По мере того как звезды образуются из этого газа, эволюционируют и возвращают бо́льшую часть продуктов ядерных превращений обратно в межзвездное пространство, в оставшемся межзвездном газе создается значительное обилие тяжелых элементов. Из этого газа продолжают возникать звезды, что приводит к прогрессирующему увеличению содержания тяжелых элементов. Сейчас межзвездный газ составляет всего несколько процентов из общей массы Галактики, следовательно, степень звездной активности мала и темп обогащения новых звезд тяжелыми элементами соответственно замедлен.

Не все звезды в процессе своего развития взрываются как сверхновые. Но, по-видимому, все звезды теряют массу, прежде чем кончить свою жизнь, превратившись в квантовомеханически вырожденные конфигурации, такие, как белые карлики или нейтронные звезды.

После того как в звезде прекращается превращение водорода в гелий, ее светимость значительно возрастает. Можно ожидать, что это увеличение светимости уничтожает жизнь на сопутствующих планетах, если только существующая там цивилизация не сможет найти способ

выжить, лежащий за пределами понимания при современном техническом развитии человеческой расы.

Одним из важных вопросов, связанных с существованием развитых цивилизаций в Галактике, является вопрос о том, каким временем располагают внеземные общества для своего развития. Возраст Галактики определен еще крайне неуверенно. Всего несколько лет назад возраст Галактики принимался равным не более чем двум миллиардам лет. Ряд недавних оценок дает величину, превышающую 25 миллиардов лет. По-видимому, основная часть данных в настоящее время указывает на возраст от 10 до 15 миллиардов лет.

Эти значения получены в результате теоретических и эмпирических подсчетов распределения светимости и цвета звезд в скоплениях. При этом делается вполне обоснованное предположение, что все звезды в данном скоплении образовались одновременно и, следовательно, существующая дисперсия светимостей и цветов является результатом эволюции звезд различной массы за время существования скопления. На точность таких оценок влияют как ошибки при определении абсолютной светимости звезд в скоплении, так и неопределенности в теории звездной эволюции.

Одним из принципиальных вопросов, которых касается эта книга, является вопрос о том, может ли существовать развитое общество на других звездах в Галактике. Очевидно, мы можем исключить очень старые звезды, состоящие из почти чистого водорода. Маловероятно, что газ, из которого образовались эти звезды, содержит достаточно тяжелых элементов для образования планет. Однако это ограничение становится неприменимым, если звезда может образоваться со значительным количеством нелетучих элементов, быть может более 10% того количества, которое содержится на Солнце. Такие условия достигаются достаточно быстро благодаря большой звездной активности, которая, по-видимому, имела место в начальный период истории Галактики.



Возраст солнечной системы составляет 4,5 миллиарда лет. Эта величина наиболее надежно определена методами, основанными на изучении периодов радиоактивного распада. Возраст Галактики, по всей вероятности,

в 2 или 3 раза превышает возраст солнечной системы. Таким образом, если время, необходимое для появления человеческой расы, является типичным для возникновения развитого общества вообще, мы можем ожидать, что у большинства звезд нашей Галактики высокоразвитые цивилизации появились несколько миллиардов лет назад, если существовали благоприятные условия для их появления.

ЛИТЕРАТУРА

1. O'Connell D. J. K., Stellar Populations, Amsterdam, 1958.
2. Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F., Rev. Mod. Phys., 29, 547 (1957).
3. Cameron A. G., W. Ann. Rev. Nucl. Sci., 8, 299 (1958).
4. Sandage A., Astrophys. J., 135, 349 (1962).
5. Woolf N. Y., Astrophys. J., 135, 644 (1962).

А. Дж. У. Камерон

3 ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Вероятно, самой древней нерешенной проблемой науки является проблема образования солнечной системы. По-видимому, Рене Декарт был первым, кто опубликовал серьезные научные соображения по этому поводу (1644 г.). Это было время, когда формировался научный метод исследования,— еще до того, как Ньютон открыл закон всемирного тяготения.

Декарт постулировал, что во вселенной, заполненной эфиром и праматерией, возможны только вихревые движения. При этом образуются вихри всевозможных размеров. Трение между вихрями сглаживает грубые очертания праматерии. Мелкие клочки стягиваются к центру самого большого вихря и образуют Солнце, в то время как более крупные сгустки становятся планетами в центрах вторичных вихрей; остальные сгустки вещества образуют спутники. Эти идеи имеют некоторое сходство с современными космогоническими идеями Вейцзекера.

За три столетия от Декарта до наших дней множество ученых предлагали решение этой центральной проблемы. Ни одно из них не было удовлетворительным, хотя многие претендовали на это. Основная трудность решения вопроса о происхождении солнечной системы состоит в разнообразии физических и химических процессов, связанных с этой проблемой. При попытке описать какой-либо из этих процессов необходимо задаться некоторыми граничными условиями, при которых данный процесс может

иметь место. Эти граничные условия требуют определенных предположений о всех остальных химических и физических процессах, которые непосредственно при этом не рассматриваются. Таким образом, даже проявление невероятной изобретательности при разработке выводов из какого-либо предположения не имеет никакой ценности, если предположение неправильно, как это случается нередко. Очевидно, в решении этой проблемы возможён лишь медленный прогресс, по мере того как все больше и больше людей изучают связанные с ней процессы и по мере того как мы накапливаем наблюдательные данные о граничных условиях, изучая такие различные предметы, как эволюция звезд и галактик, химические и физические свойства метеоритов, физику и химию планет.

В истории развития гипотез о происхождении солнечной системы можно проследить две основные линии. Одна группа гипотез, которые мы назовем «дуалистическими», постулирует, что солнечная система образовалась в результате столкновения Солнца с другой звездой. Поскольку такие столкновения представляют собой редкое явление, следствием подобных теорий является заключение о том, что в Галактике существует очень мало планетных систем. В числе основных представителей этого направления были Бюффон, Биккертон, Аррениус, Си, Чемберлен, Мультон, Джеффрис и Джинс.

Вторая группа гипотез, которые мы назовем «монистическими», предполагает, что планеты образовались путем конденсации из газовой туманности, окружающей Солнце,— возможно, как часть того процесса, в результате которого образовалось само Солнце. Из последнего предположения следует, что планетные системы встречаются в Галактике очень часто. В числе авторов, поддерживающих эти гипотезы, можно назвать Декарта, Канта, Лапласа, Биркеланда, Берладжа, Альвена, Вейцзекера, Уиппла, Койпера, Тер Хаара, О. Ю. Шмидта и Юри.

Дуалистическая гипотеза в наиболее современной форме, предложенной Чемберленом и Мультоном и развитой Джеффрисом и Джинсом, предполагает, что прохождение какой-либо звезды близко от Солнца создает большой приливной выступ, из которого в направлении

звезды-захватчика вырывается газовая струя. Далее предполагается, что струя распадается на газовые шары, при уплотнении которых и образуются планетные тела. Многие аспекты этой гипотезы вызывают серьезные сомнения. Среди трудностей, с которыми сталкивается теория, укажем следующие: во-первых, различные части струи не имеют необходимых моментов количества движения; во-вторых, высокая температура струи непосредственно после ее отрыва от Солнца приведет скорее к рассеянию в пространстве, чем к конденсации, и, в-третьих, если эффект температуры окажется недостаточным, к такому рассеянию приведет смещение вещества струи в поле приливных сил. Поскольку дуалистическая теория не дает удовлетворительного объяснения указанным эффектам, большинство ученых в настоящее время отказались от всех ее форм.

Основные вопросы, на которые должна ответить состоятельная монистическая теория, таковы:

1. Как образовалась солнечная туманность?
2. Каким путем из туманности образовались планеты и как они приобрели свои нынешние свойства?
3. Как рассеялась солнечная туманность?

Рассмотрим сначала образование солнечной туманности. По этому вопросу существовали две основные точки зрения. Согласно одной из них, Солнце захватило газовое облако из межзвездного пространства. Так полагают, например, Альвен и Литтлтон. Однако здесь также возникают трудности: скорее всего подобный захват окажется неэффективным, так как, по-видимому, исключительно трудно захватить в пределах разумного интервала времени достаточное для образования планет количество вещества. В качестве альтернативной точки зрения остается предположить, что образование солнечной туманности было частью общего процесса конденсации, в результате которого сформировалось и само Солнце.

В настоящее время имеются два основных предположения о том, как происходила эта конденсация. Первое представление, разработанное Хойлом [1], приводит к солнечной туманности с минимальным возможным моментом количества движения. Вторая теория, предложенная мной [2], предусматривает гораздо более массивную

солнечную туманность, обладающую значительно бо́льшим моментом количества движения.

Представления Хойла таковы. Все планеты, исключая, может быть, Юпитер и Сатурн, состоят в основном из нелетучих элементов; наиболее распространенные во Вселенной летучие элементы, в частности водород и гелий, потеряны. Предположим, что потерянные летучие газы возвращены на планеты в количествах, соответствующих химическому составу Солнца. Определим общий момент количества движения планет в этом случае. Припишем этот момент Солнцу, вращающемуся как жесткое тело, и посмотрим, при каком радиусе сжимающееся Солнце станет вращательно неустойчивым в экваториальной плоскости. Оказывается, что Солнце в процессе сжатия становится вращательно неустойчивым тогда, когда его радиус достигает примерно радиуса орбиты Меркурия.

Далее Хойл предполагает, что Солнце образовалось путем сжатия из межзвездного газа, и в тот момент, когда оно сжалось до размеров порядка орбиты Меркурия, момент количества движения был равен подсчитанному выше. Этот момент количества движения значительно меньше того, какой Солнце должно было бы иметь, будучи частью межзвездного вещества, откуда следует, что бо́льшая часть первоначального момента количества движения была каким-то образом потеряна. Хойл указывает, что для сохранения момента количества движения дальнейшее сжатие Солнца должно сопровождаться потерей массы в экваториальной плоскости.

Подсчитав массу, которая должна быть потеряна, чтобы образовались планеты, Хойл предполагает, что оставшийся у Солнца момент количества движения был передан диску туманности путем магнитного взаимодействия между Солнцем и диском (магнитное поле сжалось вместе с межзвездной средой при конденсации газа). Это заставляет газовый диск расшириться из центральной области внутри орбиты Меркурия по всей области внешних планет.

Вместе с Фаулером и Гринстейном Хойл полагает [3], что, пока туманность находится еще внутри радиуса орбиты Меркурия, конденсирующиеся и слипающиеся твердые тела достигают поперечника в несколько метров.

По мере того как туманность расширяется, эти планетезимали выбрасываются в область внутренних планет, где они в конце концов объединяются, образовав несколько больших тел, существующих ныне. Никакой теории этого объединения не дается. Фаулер, Гринстейн и Хойл полагают, что, пока планетезимали имеют размеры порядка одного метра, они подвергаются сильной бомбардировке заряженными частицами, ускоренными за счет происходящей диссипации магнитной энергии. Эта бомбардировка, по их мнению, является основным источником легких элементов (дейтерия, лития, бериллия и бора) на Земле и в метеоритах.

Их теория дополняется предположением, что внешние планеты (Уран, Нептун, Плутон) в большом количестве содержат лед, а внутренние (Юпитер и Сатурн) — лед, гелий и водород. Избыток водорода и гелия испаряется в пространство за пределы внешней границы солнечной системы.

Недостатком теории Фаулера, Гринстейна и Хойла является то, что она не объясняет причину потери первоначальным межзвездным веществом большей части момента количества движения, а также почему планетезимали объединяются, а не разлетаются при столкновениях. Имеется также некоторое несоответствие между результатами химического и изотопного анализов метеоритов и предполагаемым эффектом, которого следует ожидать в результате описанной выше бомбардировки заряженными частицами.

Мое собственное исследование проблемы [4] начинается с рассмотрения исходных процессов образования звезд. Средняя плотность газа в межзвездном пространстве составляет 1 атом водорода в 1 *см*^{3}, однако распределение вещества крайне неоднородно. Известно, что существуют межзвездные облака с плотностью 10 *атом/см*^{3}, а в отдельных случаях плотность достигает 1000 *атом/см*^{3}. Для того чтобы подобное облако могло стать гравитационно неустойчивым и сжаться, его гравитационная потенциальная энергия должна вдвое превышать тепловую энергию и другие формы внутренней энергии. По-видимому, это условие выполняется, когда наиболее плотные облака подвергаются внешнему давлению и

сжимаются до некоторой критической плотности порядка 1000 *атом/см³*, зависящей от массы облака.

Момент количества движения таких облаков можно оценить из тех соображений, что галактическое магнитное поле будет вынуждать облако делать один оборот вокруг своей оси за период орбитального обращения вокруг центра Галактики. Такое гравитационно неустойчивое облако имеет массу, вероятно, в несколько тысяч раз превышающую массу Солнца.

По мере сжатия облака различные механизмы охлаждения, связанные с излучением энергии при столкновении атомов, становятся все более эффективными. Поэтому сжатие не будет сопровождаться высоким тепловым давлением внутри облака, и процесс станет приближенно изотермическим. Отсюда вытекает важное следствие: с течением времени отдельные части облака могут стать неустойчивыми относительно гравитационного сжатия, и облако разобьется на отдельные образования, связанные с флуктуациями плотности в облаке. По мере возрастания плотности разбиение облака будет продолжаться.

Процесс сжатия и разбиения прекратится только при установлении приближенного гидростатического равновесия частей облака. Равновесие достигается при достаточно большой непрозрачности материи облака, обеспечивающей прекращение излучения наружу и необходимое повышение внутренней энергии. Недавно Гостэд показал, что непрозрачность вещества облака остается слишком малой для прекращения сжатия до тех пор, пока температура в центре образования не повысится настолько, что начинается диссоциация молекул водорода.

Диссоциация всех молекул водорода и полная ионизация водорода и гелия в таких объектах требует гораздо бо́льших затрат энергии, чем может обеспечить имеющаяся на данной стадии сжатия гравитационная энергия. Отсюда следует, что в невращающихся образованиях чисто тепловая энергия не может возрасти настолько, чтобы обеспечить гидростатическое равновесие, пока процесс ионизации не будет почти полностью закончен. Недавние вычисления Дилгана, Эзера и автора показали, что звезда с массой, равной солнечной, достигает состояния гидростатического равновесия, когда ее радиус

станет равным 0,27 астрономической единицы (а. е.), т. е. внутри орбиты Меркурия.

Однако как будто не существует никакого способа для передачи значительной доли момента количества движения сжимающегося облака или его части окружающей среде, не участвующей в сжатии. Облако связано с окружающей средой силовыми линиями галактического магнитного поля, но гравитационный коллапс при свободном падении происходит достаточно быстро, так что на окружающую межзвездную среду будет влиять очень слабый магнитный момент. Таким образом, весьма вероятно, что части облака будут иметь тот же момент количества движения, что и до начала сжатия. Отсюда следует, что эти куски станут вращательно неустойчивыми задолго до того, как они сожмутся до радиуса 0,27 астрономической единицы.

Маловероятно, что в процессе сжатия в кусках разовьются значительные центральные конденсации. Поэтому следует рассматривать образования типа тонких дисков, возникающие при сжатии равномерно вращающейся однородной сферы. Эта проблема обсуждалась Местелем в связи с коллапсом газовых шаров при образовании галактик. По-видимому, образуются два типа дисков, отличающихся различным распределением массы. Поверхностная плотность одного типа дисков определяется по формуле

$$m = m_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где m_0 — постоянная величина, R — радиус диска, r — расстояние от центра. Диски этого типа вращаются с постоянной угловой скоростью; мы будем называть их «однородными» дисками, имея в виду медленное изменение поверхностной плотности вблизи центра. Диски второго типа обладают «осевой концентрацией». Их поверхностная плотность изменяется приблизительно обратно пропорционально расстоянию от центра; характер изменения угловой скорости такой же.

Причиной существования двух решений является то, что в одном случае (для диска с осевой концентрацией) потенциал, определяющий движение частиц, зависит только от массы внутри орбиты частицы, в то время как

для однородного диска потенциал зависит от распределения массы как внутри, так и снаружи орбиты частицы. Мы не можем сейчас решить, какой из двух типов газовых дисков образуется в природе в результате рассматриваемого нами коллапса части облака.

Как мы видим, полезно предположить, что часть образований принадлежит к одному типу, а часть — к другому.

Из рассмотрения условия сохранения момента количества движения следует, что радиус образующегося однородного диска должен быть порядка нескольких десятков астрономических единиц. Неясно, под действием каких сил могла бы произойти дальнейшая концентрация вещества к центру. С другой стороны, ядра двух звезд могут быть образованы азимутальным смещением масс вдоль орбит в направлении любого диаметра диска. Поэтому вполне вероятно, что такие диски дают начало системам двойных звезд. Около 80% звезд в окрестности Солнца принадлежат к двойным системам. В этом случае условия для образования планет, обращающихся вокруг этих звезд, не представляются благоприятными.

Вероятно, диски с осевой концентрацией также образуются с радиусом в несколько десятков астрономических единиц. Однако, как мы видели, такому диску свойственно неоднородное вращение. Относительный сдвиг слоев газа, лежащих на различных расстояниях от центра, будет «натягивать» силовые линии первоначального межзвездного магнитного поля, которое сжималось вместе с газом. В результате магнитная энергия возрастает за счет энергии дифференциального вращения, что приводит к перераспределению массы в диске. Бóльшая часть массы увлекается по спирали во внутрь, в то время как незначительная часть ее движется наружу и уносит с собой бóльшую часть момента количества движения диска.

Я не могу предложить никакого более детального механизма образования планет из такого диска. Однако очевидно, что, поскольку в результате какой-либо химической конденсации и аккумуляции внутри газовой туманности достаточно быстро могут образоваться большие тела (с размерами порядка размеров астероидов), движение газа во внутренние части туманности увлечет эти сконденсировавшиеся тела в формирующееся Солнце. При этом масса диска, разумеется, значительно превосходит ту, которую принимал Хойл, и момент количества движения соответственно также больше предполагаемого Хойлом. Таким образом, нынешние планеты являются результатом весьма неэффективного использования нелетучих веществ туманности; это согласуется с предположением о том, что бóльшая часть сконденсировавшейся материи переносится к Солнцу. Исключение составляют окраинные области солнечной системы, где потоки газа направлены наружу и вследствие этого твердые тела выбрасываются на расстояния в несколько десятков астрономических единиц от Солнца.

Мы заканчиваем описание картины образования солнечной системы следующим замечанием. Когда на Солнце образуется горячая корона, возникает солнечный ветер, который будет, по всей вероятности, рассеивать остатки газа в диске туманности. Шацман показал, что взаимодействие между магнитным полем Солнца и дующим во внешние области солнечным ветром может передать вытекающей наружу плазме момент количества движения, достаточный для замедления вращения Солнца.

Упомянутые выше расчеты Эзера и автора подтвердили предположение Хаяши о том, что Солнце на ранней стадии сжатия обладало повышенной светимостью и было целиком конвективным. Светимость была, вероятно, в 100 раз больше современной светимости Солнца, по крайней мере в течение нескольких тысяч лет. Следовательно, зарождающиеся планеты могли подвергнуться кратковременному высокотемпературному воздействию со стороны окружающей среды.

Представление о том, каким образом внутри солнечной туманности происходила конденсация, пока еще содержит ряд противоречий и неясностей. Юри указал на то, что в одном важном отношении химический состав Луны отличается от состава Земли и метеоритов: на Луне обнаруживается недостаток железа по сравнению с другими смежными элементами. На Солнце наблюдается такой же недостаток железа. Если рассматривать сильное искажение фигуры Луны как свидетельство твердого состояния вещества в ее недрах из-за низкой температуры недр Луны, то Луна должна быть бедна

калием по сравнению с Землей и с метеоритами. Интересно выяснить, как возникают такие различия.

Другой весьма важный вопрос: какова природа источника тепла, нагревающего внутренние области тел, порождающих метеориты, до температуры, при которой плавится железо. Развивая старую идею Юри, Фиш, Гоулз и Андерс предполагают, что это нагревание происходит в результате действия остаточной радиоактивности, вероятно Al^{26}. Радиоактивность могла появиться в межзвездной среде как результат активности сверхновых еще до процесса конденсации, приведшего к образованию солнечной системы. Возможно также, что радиоактивность возникла непосредственно в солнечной туманности в результате бомбардировки заряженными частицами.

Однако Юри указывает, что наличие остаточной радиоактивности делает трудно объяснимым существование относительно холодных недр Луны. Поэтому он предполагает, что газ в солнечной туманности был разбит на самогравитирующие сферы, в каждой из которых масса нелетучего вещества была приблизительно равной массе Луны. Это нелетучее вещество локализовалось в центре и нагревалось по мере сжатия газа. Юри считает, что планеты формируются при столкновении подобных сфер, в результате чего газ мог диссипировать и могли возникнуть твердые образования. Он также полагает, что Луна является сохранившимся центральным телом такой газовой сферы. Вуд смог получить небольшие стеклянные образования, найденные в хондритовых метеоритах, при высоких температуре и давлении, которые, как можно предполагать, существовали в подобных газовых сферах.

Трудность теории образования таких газовых сфер заключается в объяснении того, каким образом формирующиеся планеты полностью теряют все присутствовавшие в газовых сферах тяжелые газы, например криптон и ксенон. По отношению к соседним элементам периодической системы Земля сохранила только одну миллионную часть этих газов или даже менее. С другой стороны, столкновения твердых тел в пустом пространстве, как правило, должны приводить к их разрушению, а не объединению. Последние исследования столкновений тел при очень высоких скоростях позволяют думать, что столкновения

метеоритов и микрометеоритов с лунной поверхностью приводят к чистой потере массы Луной. Детальное исследование процесса аккумуляции является одним из наиболее важных нерешенных вопросов, связанных с происхождением солнечной системы.

При попытке обобщить имеющиеся теории образования солнечной системы на случаи других планетных систем мы обнаруживаем, сколь несовершенны наши представления в этой области. Поскольку большинство наших предположений носит скорее качественный, нежели количественный характер, мы не можем судить о том, насколько рассмотренные выше разнообразные условия присущи другим планетным системам, связанным с подобными Солнцу звездами, не говоря уже о звездах других типов.

По моему мнению, следует серьезно взвесить следующие предположения.

Наиболее вероятно существование планетных систем у тех 20% звезд, которые, по-видимому, являются одиночными. Я не верю в то, что наличие или отсутствие у этих звезд быстрого вращения является достаточным признаком для решения вопроса о существовании у них планетной системы. Такой способ различения звезд с планетами или без них принимается многими авторами этой книги. Возможно, что все одиночные звезды имеют планетные системы какого-нибудь вида.

Размеры образующихся вокруг одиночных звезд туманностей непременно будут различными. Это является неизбежным следствием значительных различий плотности и скорости вращения межзвездных облаков, которые становятся гравитационно неустойчивыми. Размер образовавшегося плоского диска весьма чувствителен к указанным величинам. В свою очередь вариации размеров дисков, вероятно, приводят не только к сильным различиям в характере распределения и в массах конденсирующихся планет, но и влияют на количество концентрирующегося в центральных областях диска вещества, из которого формируется звезда. Поскольку поверхностная плотность и радиус диска меняются почти независимо, мы не можем ожидать простого соотношения между размерами и распределением орбит планет, с одной стороны,

и массой звезды — с другой. Однако из того, что скорость вращения облаков газа, расположенных ближе к центру Галактики, больше, чем у облаков в нашей окрестности, следует, что диски, образовавшиеся в центральных областях Галактики, в среднем значительно превосходят по размерам те, которые находятся вблизи Солнца. Таким образом, можно ожидать, что планеты, опять-таки в среднем, имеют меньший размер, чем планеты солнечной системы. Отсюда следует, что меньшая часть таких систем может быть пригодна для развития жизни.

Следует отметить, что приведенные выше рассуждения о возникновении звезд относятся в основном к процессам, происходящим в газовых облаках спиральных рукавов нашей Галактики. Условия формирования звезд были, очевидно, совершенно иными, когда происходило образование плотных сферических и богатых галактических звездных скоплений. Вопрос о том, как много планетных систем содержится в таких скоплениях, остается открытым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoyle F., Quart. J. Roy. Astron. Soc., 1, 28 (1960).
2. Ed. Jastrow R., Cameron A. G. W., Proc. of the Conference on the Origen of the Solar System, N. Y., 1964.
3. Fowler W. A., Greenstein J. L., Hoyle F., Geophys. J., 6, 148 (1962).
4. Cameron A. G. W., Icarus, 1, 13 (1962).

А. Дж. У. Камерон

4 РАННЕЕ РАЗВИТИЕ ЗЕМЛИ

Мы уже видели, сколь неопределенны наши представления о происхождении и развитии солнечной системы. Особенно спорным является вопрос о том, каким образом газ и пыль солнечной туманности объединились в планеты. Только одна особенность этого процесса кажется относительно твердо установленной: такое объединение не может происходить при очень высокой температуре. Первым, кто начал защищать идею «холодной аккреции», был Юри. Он развивал эту идею на основании того, что при высокой температуре такие элементы, как мышьяк, становятся летучими и Земля должна была в основном их потерять.

После того как Земля сформировалась, она подверглась полной дифференциации химического состава. Детали этого процесса почти полностью скрыты от нас. Земля образовалась 4,5 миллиарда лет назад. Самые старые поверхностные горные породы, возраст которых можно определить, образовались 3,5 миллиарда лет назад. Таким образом, первый миллиард лет истории Земли нигде не зафиксирован. Именно тогда и происходила дифференциация, но мы не знаем, как долго длилась ее основная стадия.

Сейсмологи установили, что Земля имеет правильную слоистую структуру. У поверхности расположен тонкий слой земной коры, глубже находится мантия, состоящая из веществ, подобных силикату магния, и, наконец,—

жидкое ядро, состоящее в основном из железа. Характер распространения сейсмических волн изменяется в непосредственной близости к центру Земли, и этот факт интерпретируется (хотя и не очень уверенно) как наличие твердого внутреннего ядра Земли. Разумеется, такая слоистая структура не могла образоваться без обширных процессов плавления во внутренних областях Земли. Расчеты показывают, что выход тепловой энергии в результате естественной радиоактивности таких элементов, как калий, торий и уран, вполне достаточен для того, чтобы обеспечить плавление в необходимом масштабе.

Земная кора состоит в основном из веществ, которые плавятся при относительно низких температурах и плотность которых сравнительно мала. Эти вещества вышли на поверхность Земли через трещины в мантии, но подробности этого процесса неизвестны. Существуют две школы исследователей мантии. Представители одной школы полагают, что мантия статична и породы земной коры выходят на поверхность через поры, такие, как жерла вулканов. Представители другой школы интерпретируют ряд геологических явлений как указание на то, что мантия подвергается конвективному перемешиванию. Согласно этой точке зрения, породы земной коры непрерывно выносятся на поверхность восходящими потоками в конвективных ячейках. Перемещения материков также вызываются конвективными движениями.

В атмосфере Земли наблюдается значительный недостаток инертных газов. В 1 *г* метеоритного вещества нередко содержится на 2 порядка больше инертных газов, чем на Земле (включая и атмосферу). Особенно интересным является элемент ксенон. Изотопный состав атмосферного ксенона совершенно иной, чем у метеоритного. Двумя различными источниками ксенона является радиоактивный распад I^{129} и Pu^{244}, период полураспада которых равен соответственно 17 и 76 миллионам лет. Первый распадается с образованием Xe^{129}, второй время от времени претерпевает спонтанное деление с образованием изотопов ксенона, имеющих избыток нейтронов.

Я объясняю различия в обилии нейтроно-дефицитных изотопов ксенона нейтронным облучением ксенона в Солнце в период сжатия последнего с выгоранием дейтерия.

Этот анализ показывает, что бóльшая часть атмосферного ксенона была некогда на Солнце, и на Земле он появился, вероятно, путем захвата из солнечного ветра. Это заключение является спорным, но в случае его правильности можно сделать вывод, что состав земной атмосферы не обязательно сохраняется неизменным с момента образования из первоначальной солнечной туманности.

В метеоритах часто наблюдаются большие вариации содержания Xe^{129}. Это указывает, что небесные тела, порождающие метеориты, содержали значительное количество I^{129} в период их образования и были достаточно холодными, чтобы сохранить инертные газы. Однако несмотря на гораздо меньшее содержание ксенона на единицу массы, на Земле обнаруживается очень небольшой избыток Xe^{129}. Я интерпретирую этот факт как указание на то, что Земля не могла удержать ксенон, выделявшийся из ее недр еще почти 100 миллионов лет после того, как тела, из которых образовались метеориты, остыли. Количество продуктов распада Pu^{244} находится в согласии с такой интерпретацией. Андерс пришел к аналогичному выводу, пользуясь иными рассуждениями. Много лет назад Браун указал, что на Земле обнаруживается гораздо меньший недостаток химически активных летучих газов, таких, как H_2O, CO_2, N_2, чем инертных газов. Очевидно, углеродные, азотные и кислородные соединения существовали на Земле в форме твердых тел, и эти элементы впоследствии выделялись в атмосферу и образовали океаны. Только после этого могла начаться химическая эволюция, которая приводит к образованию жизни.

Эта химическая эволюция обсуждается в следующей главе. Отправной точкой его теории эволюции является предположение о существовании разреженной атмосферы на Земле на раннем этапе развития, причем эта атмосфера была богата водородсодержащими соединениями, оставшимися от первоначальной солнечной туманности.

Мы видели выше, что такое прямое удержание маловероятно. Однако небольшое количество водородсодержащих соединений будет сохраняться в недрах Земли и пополнять разреженную атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jeffrys, The Earth, 4th ed., N. Y., 1962. (Русский перевод: Джеффрис Г., Земля, ее происхождение, история и строение, М., 1960.)
2. Brown H., in «The Atmospheres of the Earth and Planets», ed. G. P. Kuiper, 2nd ed., Chicago, 1952. (Русский перевод 1-го изд.: «Атомосферы Земли и планет», М., 1949.)
3. Omders E., Rev. Mod. Phys., 34, 287 (1962).
4. Cameron A. G. W., Icarus, 1, 13 (1962).

М. Кальвин

5 ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

I. *От молекул до микроба*

ЧТО ТАКОЕ ЖИЗНЬ?

Проблема происхождения жизни на Земле интересовала человека еще с того времени, когда он впервые задумался о собственном месте на Земле и во Вселенной. Разные люди предлагали различные решения этой проблемы. Я хочу попытаться рассказать, как решает эту проблему современная наука, и всюду, где возможно, давать ответы с позиции, которую можно подтвердить или опровергнуть наблюдениями или экспериментом.

Нельзя сказать, что это единственный путь, который может (или должен) привести нас к ответу. Имеются и другие пути, и для многих людей ответы с иных позиций не только приемлемы, но и вполне их удовлетворяют. Однако в данной статье мы ограничимся ответом с позиций науки. В течение многих лет,— по-видимому, до последнего десятилетия — было невозможно обсуждать эту проблему с научной точки зрения. Для того чтобы объяснить этот пробел, его возникновение и решение проблемы, необходимо немного углубиться в историю.

Ключом к нашему изложению является слово «эволюция» в заголовке этой статьи; мы собираемся проэкстраполировать идею Дарвина на отдаленные времена. В 1858 г. Дарвин и Уоллес совместно опубликовали в Сообщениях Лондонского Линеевского общества свой хорошо известный трактат [1]. Уоллес до этой совместной публикации написал статью под названием «О тенденции к многообразию при неограниченном удалении от перво-

начальных видов» [2] (см. также [1]). Название точно описывает природу органической эволюции, но статья под этим заголовком не вышла. Копии этого манускрипта еще можно найти, но, насколько я знаю, сама статья никогда не появлялась в научной периодике. Уоллес выдвигает идею, что роды (или виды), в настоящее время совершенно различные, были когда-то двумя разновидностями одного рода и что с каждым шагом в прошлое снова оказывается, что два различных организма были когда-то двумя разновидностями одного рода, и так далее в глубь времен. Совершенно очевидно, что если принять это представление об эволюционных изменениях, то можно, переходя ко все более отдаленному прошлому, прийти к точке, когда существовали только два вида живых существ. В конце концов эти *два* вида становятся разновидностями единственного вида живой материи. Этот «живой» вид был в свою очередь одной из разновидностей организаций органических молекул, часть которых дала начало тому роду, который мы теперь называем «живыми формами». Другие же позднее исчезли при построении организаций, растущих быстрее.

Дарвин в своих самых ранних работах признавал это толкование сущности основного понятия эволюции. Недавно появилось до сих пор не публиковавшееся письмо Чарльза Дарвина Джорджу Чарльзу Уэллишу, датированное 28 марта 1882 г., которое сэр Гавин де Бир считает последним письмом, продиктованным и подписанным Дарвином [3]. Дарвин писал:

«Вы почти точно выражаете мою точку зрения, когда говорите, что я намеренно ставил вне обсуждения вопрос о происхождении жизни, как являющийся *ultra vires* [за пределами возможного] при настоящем состоянии нашего познания, и что рассматриваю лишь механизм наследования. Я не встречал ни одного доказательства, которое бы по меньшей мере заслуживало доверия и свидетельствовало в пользу так называемого самопроизвольного зарождения. Мне кажется, я где-то сказал (но не могу найти место), что принцип непрерывности приводит к тому, что принцип жизни, как должно быть показано дальше, является частью или следствием некоторого общего закона...».

Утверждение, на которое Дарвин ссылается и которое он забыл, было сделано им гораздо раньше в письме, написанном до 1871 г.:

«Часто говорят, что все условия для первого производства живого организма, которые могли когда-либо существовать, имеются в настоящем. Но если (О! как велико это если!) мы могли бы себе представить, что в некоем небольшом теплом водоеме со всеми видами солей аммониевой и фосфорной кислоты имеются свет, тепло, электричество и пр. и химически образовано протеиновое соединение, готовое подвергнуться еще более сложным изменениям, то в настоящее время такое вещество должно быть немедленно уничтожено или поглощено, чего не могло бы произойти до образования живых организмов».

В этих двух замечаниях Дарвина скрыт фундамент всех современных представлений о происхождении жизни на Земле. Для людей, занимающихся наукой, я подчеркиваю, что основные идеи, которые излагаются ниже, являются и еще в течение некоторого времени должны оставаться гипотезами. Я буду опираться всюду на эксперименты или наблюдения, которые могут быть интерпретированы с точки зрения основной идеи, но сама идея остается предположением, возможно, до тех пор, пока мы не совершим путешествие на какую-нибудь планету солнечной системы (или другие миры) и не сможем увидеть этот процесс химической эволюции, ушедший дальше или задержавшийся по сравнению с нашей Землей. К счастью (или к несчастью), этот день не слишком далек, и именно по этой причине мы должны заинтересоваться всеми доступными данными и идеями о происхождении жизни на Земле, чтобы знать, что же именно искать, когда мы попадем на другие планеты.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВОЗНИКНОВЕНИИ ЖИЗНИ

Почему же, несмотря на полную ясность высказанной Дарвином идеи, ей не следовали в течение почти века? Ответом служит работа одного химика, опубликованная в начале 1863 г., через два-три года после статьи Дарвина. Это была работа Луи Пастера. В течение нескольких

предыдущих столетий появлялись сообщения о самопроизвольном зарождении самых разнообразных существ, начиная от людей и до мышей, птиц и микробов, но в конце концов для каждого из этих существ был проделан соответствующий эксперимент, демонстрирующий, что эти живые существа произошли от ранее живших существ. Пастеру осталось доказать это для микробов, которые были последним звеном в этой цепи последовательных отступлений от идеи самопроизвольного зарождения. Пастер сделал это очень убедительно и изящно в своих экспериментах, опубликованных в 1862 г. Он показал — и категорически утверждал,— что жизнь не может возникнуть в современных условиях (как он их определил) иным путем кроме как от уже существующих живых существ. На уровне тогдашних знаний это было неуязвимое заключение. Вот почему, хотя дарвиновская идея по существу требовала далекой экстраполяции в прошлое, лишь несколько смелых людей продолжили работу Дарвина, относящуюся к середине 1860 г. Одним из них был первый профессор геологии Мичиганского университета Александр Винчел, который написал книгу «Эскизы творения» [4], но после него было сделано очень мало.

Нападки на Винчела были очень жестокими. Он ушел из Мичигана в Теннесси, где стал профессором геологии. Спустя два года ему предложили подать в отставку, но он отказался это сделать без публичного сообщения опекунов университета о причине отставки. Они этого не сделали и упразднили его должность. Винчел вернулся в Мичиган, написал свою книгу, и Мичиган долго оставался местом плодотворного изучения зоологии и геологии.

Пожалуй, за период времени между книгой Винчела (1870 г.) и работами английского биолога Холдейна (1928 г.) [5] и советского биохимика Опарина в середине 30-х гг. [6] было очень немного серьезных попыток ответить на вопрос о происхождении жизни с научных позиций того времени.

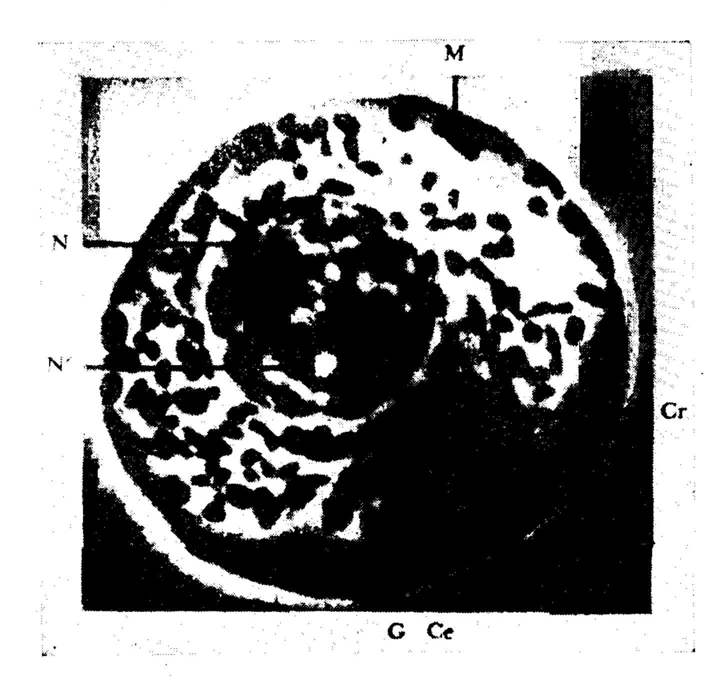
ЧТО ТАКОЕ ЖИЗНЬ?

Теперь мы гораздо лучше знаем природу тех веществ, из которых построены живые организмы. Последние два десятилетия особенно благоприятствовали попытке мысленно воссоздать последовательность событий (в согласии с нынешним уровнем науки), приводящих при обычных физико-химических процессах к таким формам, которые мы считаем «живыми». Распознавание жизни на уровне человека или даже амебы представляет собой несложную задачу. Однако это становится немного труднее, когда мы приближаемся ко все более и более простым организмам, на пограничной же линии между живым и неживым это становится очень трудным.

Прежде чем мы рассмотрим более тонкие моменты определения, которое мы хотим разработать, давайте взглянем на одну из простейших форм единиц живого вещества, по крайней мере у более развитых организмов: на одну клетку. На рис. 1 показана структура клетки во всем ее сложном великолепии. Это — красный кровяной шарик человека, содержащий все виды структурных элементов. Ниже на рисунке дана схема строения клетки и указаны названия ее различных элементов. На подобной фотографии нельзя показать тот замечательный факт, что сама основная субстанция — вещество, которое окружает хорошо заметные структурные элементы, также обладает сложной структурой. Строго упорядочены не только ядро, митохондрии и другие элементы, но и все белковое вещество клетки тоже имеет сложную структуру.

Эта структурность является одним из наиболее важных свойств всех живых существ. Оно представляет собой развитие той упорядоченности, которую мы должны проследить, начиная с неживых физических комплексов.

Можно сказать еще несколько слов о живой клетке, в которой, возможно, самым простым образом суммирована вся информация, являющаяся целью наших исследований. Сначала мы должны составить органическую молекулу, которая в конце концов вошла бы в состав клеточной структуры. Затем необходимо объединить эти молекулы в высокоорганизованную систему. В итоге они должны быть способны к самовоспроизведению и преобразованию энергии. Это и есть основные свойства, которые мы должны воссоздать. Схема 1 дает представление о совершающейся последовательности химических превращений. Атомы углерода, водорода, кислорода и азота в их простей-



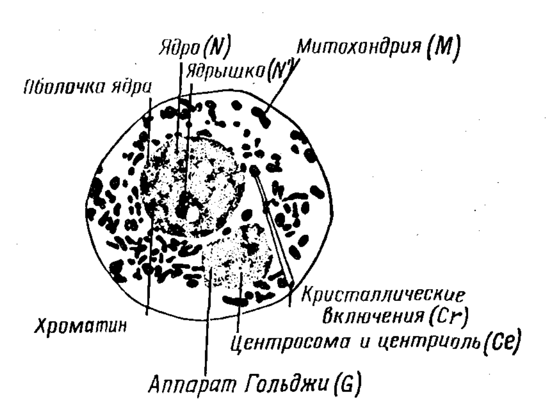


Рис 1 Строение клетки эритроцита человека.

ших комбинациях должны быть преобразованы сначала в небольшие молекулы различных типов; затем эти молекулы должны превратиться в гигантские молекулы, из

Атом	Молекула	Полимер
Водород	Аминокислота →	Белок
Углерод	Сахар →	Целлюлоза
Кислород	Основание →	Нуклеиновая кислота
Азот	Кислота →	Жиры

Схема 1

Диаграмма, представляющая ряд преобразований, необходимых для образования структуры клетки, начиная с атомов.

которых в свою очередь возникнут характерные клеточные структуры, показанные на рис. 1. Рассмотрим по очереди каждый из этих этапов.

ШКАЛА ВРЕМЕНИ

Период времени, необходимый для превращения простых элементов в простейшие живые организмы, очень длителен. Для этого потребовалось 5 млрд. лет. Из рис. 2 видно, что период развития человека занимает крайне малую часть времени эволюции. Зубчатая линия отделяет период формирования Земли, который закончился примерно 4 млрд. лет назад. Вслед за формированием Земли был период, названный нами «химической эволюцией». Он продолжался до тех пор, пока не появилась жизнь, что обозначено словами «органическая эволюция». Эта эволюция продолжается до настоящего время, поскольку больше не происходит никакой химической эволюции (в прежнем смысле), так как не осталось никаких органических соединений, кроме тех, которые связаны с живыми организмами. Сегодня мы можем даже добавить к органической эволюции новый ее этап — психосоциальную эволюцию.

Здесь мы коснемся только того периода химической эволюции, который начался после формирования Земли

в ее настоящем виде и привел к появлению простейших форм, которые мы назвали бы «живыми» [7].

Основное понятие эволюции содержит в себе определение природы жизни. Я избегаю определения особой точки в этой схеме событий, до которой жизнь не существовала,

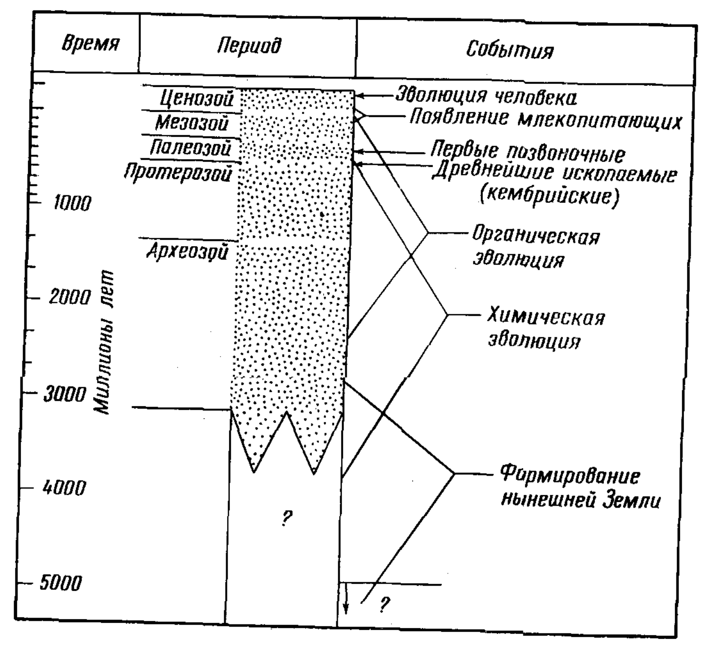


Рис. 2. Шкала времен эволюции.

а после которой она появилась. Я думаю, что невозможно определить такую точку во времени (не говоря уж о степени точности). Причина состоит в том, что совокупность качеств — химических веществ, организации и взаимодействия,— которые должны быть связаны с одной областью пространства, прежде чем мы назовем эту область «живой формой», может отличаться от особи к особи. Генетик может быть совершенно удовлетворен, заявив, что в тот момент, когда он получает самовоспроизводящуюся молекулу, он получает «живую» форму; зоолог не склонен принять такое определение и потребует

более ярко выраженных процессов обмена, прежде чем он назовет что-то «живым». Другие специалисты потребуют не только процессов обмена веществ и самовоспроизведения, но и клеточных оболочек. Имеется много таких свойств, которые, взятые вместе в достаточном числе в определенной области пространства, позволят многим из нас назвать эту форму «живой» [8—10]. Поэтому я избежал точного определения того, что́ мы пытаемся рассмотреть в процессе эволюции: мы попытаемся исследовать все эти различные качества и в конце концов отобрать из них «подходящее» число для какой-либо одной области пространства.

ПЕРВИЧНАЯ АТМОСФЕРА

Для того чтобы образовались молекулы, прежде всего необходимы атомы. Основные атомы живого — это углерод, азот, кислород, водород и немногие другие. Откуда же они появились? Прежде всего водород — наиболее распространенный элемент во Вселенной; углерод, азот и кислород находились на поверхности Земли (и присутствуют повсюду в солнечной системе) первоначально в соединении с водородом. Предполагается, что первичная атмосфера Земли содержала в основном следующие четыре вещества (или четыре молекулы): водород; соединенный с водородом углерод в форме метана; соединенный с водородом кислород в форме воды и соединенный с водородом азот в форме аммиака. Именно из этих веществ мы должны получить все остальное; это — наша отправная точка, наша первичная атмосфера, из которой мы должны составить первичные молекулы для построения живого.

Здесь мы имеем возможность поставить эксперимент. Можно определить, сочетание каких условий необходимо для того, чтобы началось преобразование этих четырех-пяти первичных соединений в более сложные. Обнаружено, что почти любой процесс, который отрывает атомы друг от друга, приводит к более сложным молекулам, после того как произошло их разделение, и существуют различные процессы, посредством которых эти атомы можно оторвать друг от друга [6, 8]. Солнечный ультрафиолет, ионизующее излучение космических лучей или радиоактивных элементов первобытной Земли (воссоздан-

ное при экспериментах на наших циклотронах) и молнии — три основных агента, которые расщепляют молекулы такого типа и позволяют выяснить, могут ли эти атомы перегруппироваться в более сложные вещества.

Выяснилось, что это действительно может происходить. В 1950 г. был проведен один из первых экспериментов для выяснения такой возможности; в качестве источника ионизующего излучения использовался циклотрон. Мы начали с двуокиси углерода (вместо метана) и водорода, и нам удалось получить раскисленные соединения углерода,

H–O–H — *Вода*

O=C=O — *Двуокись углерода*

CH_4 — *Метан*

H–H — *Водород*

NH_3 — *Аммиак*

H–C(=O)–OH — *Муравьиная кислота*

CH_3–C(=O)–OH — *Уксусная кислота*

HO–C(=O)–CH_2–CH_2–C(=O)–OH — *Янтарная кислота*

H_2N–CH_2–C(=O)–OH — *Глицин*

Рис. 3. Первичные и простейшие органические молекулы.

такие, как муравьиная кислота и формальдегид [11]. С этого времени полностью пересмотренная теория первичной атмосферы стала получать все возрастающее признание [6, 8]. Было проведено большое число разнообразных экспериментов, использующих ионизующее излучение, ультрафиолетовый свет и электрические разряды; при этом простые молекулы превращались в более сложные [6, 8, 12, 13]. На рис. 3 показаны первичные молекулы (вода, метан, водород, аммиак и двуокись углерода), из которых после разрушения их разрядами, ионизующим излучением или ультрафиолетом были получены более сложные молекулы, изображенные в нижнем ряду рис. 3. Эти молекулы образовались из верхнего ряда в результате воздействия электрического разряда или ионизующего излучения. Ультрафиолетовое излучение

оказалось не столь эффективным (об этом будет сказано ниже). Важно заметить, что эти превращения были осуществлены в лаборатории с элементами, существовавшими на первобытной Земле, посредством сил, которые также существовали на первобытной Земле.

Эти молекулы (муравьиная кислота, уксусная кислота и глицин) являются теми самыми молекулами, из которых строятся современные живые формы. Таким образом, мы перешли от атомов к примитивным молекулам — аминокислотам (глицин — одна из них), сахарам (соединения того же класса, что и формальдегид) и жирам (соединения того же класса, что и уксусная кислота). Основания здесь не показаны, так как, когда составлялась эта схема, мы не знали, могут ли подобным путем получаться основания. Теперь мы знаем, что могут, и более подробно обсудим это дальше.

ЭВОЛЮЦИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ

Следующий шаг состоит в отыскании более эффективных путей преобразования первых молекул. Если мы преобразуем все первоначальные элементы — водород и углерод, азот и кислород в их соединениях с водородом — в более сложные молекулы, такие, как муравьиная кислота, уксусная кислота, янтарная кислота и глицин, то те же силы, которые разрушали простейшие молекулы, начнут разрушать и более сложные. До тех пор пока не будет какого-то отбора среди происходящих процессов, более сложные молекулы будут снова разлагаться на мелкие с еще более случайным построением.

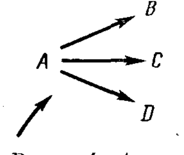


Рис. 4. Автокатализ.

Путь отбора среди протекающих процессов состоит в процессе аутокатализа, простейшая форма которого показана на рис. 4. Если вещество A может превратиться в вещества B, C или D и если оказывается, что вещество D таково, что оно ускоряет процесс превращения A в D, то A само собой быстрее превратится в D, чем в C или B. Вот это мы и называем аутокатализом: D является катализатором для своего собственного образования, и любое

случайное появление такого вещества будет автоматически отбирать из всех случайных реакций, которые могут произойти, предпочтительно те, которые ведут к аутокатализаторам.

На рис. 5 и 6 показана эволюция таких аутокатализаторов. На рис. 5 изображается развитие каталитической функции иона железа, который присутствует в море и служит катализатором для разложения перекиси водорода; последняя образуется при тех же условиях облучения,

Рис. 5. Эволюция катализатора для реакции $H_2O_2 \rightarrow H_2O + \frac{1}{2} O_2$.

при котором образуются и другие молекулы. Родственный механизм катализа — действие пероксидазы — может сделать перекись водорода полезной при образовании каталитических соединений других типов. С самого начала развития органических веществ необходимо существование некоего механизма для разложения (и использования) перекиси водорода, и им могло быть железо, особенно если оно входит в состав более сложной молекулы. Эффективность простого иона железа составляет всего одну стотысячную. Если же железо входит в состав молекулы гема, эффективность возрастает до одной сотой, так что, по-видимому, гем вскоре замещает водный ион железа. Когда в конце концов железо войдет в состав новой молекулы (каталазы),

которая выполняет ту же самую функцию, его эффективность возрастет в 10 000 000 000 раз по сравнению с первоначальным водным ионом железа. Таким образом, на примере каталазы видно, как молекулы с простыми «зачаточными» функциями могут превратиться в молекулы с очень совершенными свойствами [14, 15].

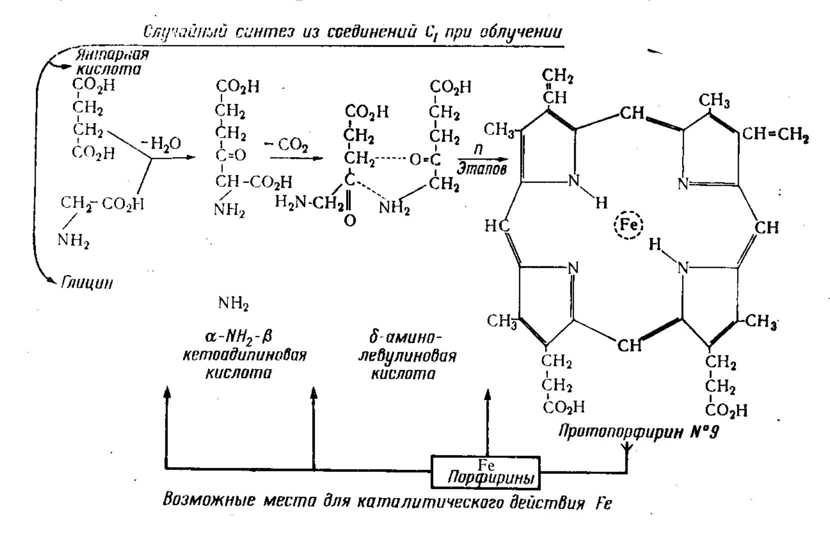


Рис. 6. Эволюция каталитических функций железа и биосинтез порфирина.

На рис. 6 показан возможный путь эволюции каталитической функции железа и процесс биосинтеза порфирина. Здесь представлена последовательность реакций, начиная от соединений, которые, как мы видели, были случайно синтезированы облучением (янтарная кислота и глицин), до порфиринов. Последовательность реакций включает простую конденсацию, за которой следует декарбоксилирование, и другую конденсацию, за которой в свою очередь следует ряд окислительных ступеней, ведущих в итоге к образованию тетрапиррола. Если любая из этих ступеней катализируется железом и если железопорфириновые структуры оказываются лучшими катализаторами для любой из этих ступеней, чем просто

железо, то с началом этого процесса (его начало определяется случайным синтезом и конденсацией) автоселекция этой последовательности должна увеличивать превращение янтарной кислоты и глицина в δ-аминолевулиновую кислоту и окончательно в порфирин. Уже доказано, что в присутствии железа и кислорода, а также ионизующего излучения или даже ультрафиолета можно действительно синтезировать в небольшом количестве порфирин при помощи примитивных каталитических свойств железа и самих железо-порфириновых соединений [16].

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛ

СТРУКТУРА БЕЛКА

Мы перешли от случайного синтеза к избирательному и теперь вступаем в эпоху, для которой характерно большое количество маленьких молекул. Нам необходимо изобрести пути получения из более сложных из этих молекул полимеров (гигантских молекул) и аминокислот; последние составляют один из основных классов соединений, гигантские молекулы которых могут быть образованы посредством сцепления вместе небольших молекул, остаток к остатку. Основной остаток и кислотный остаток могут неограниченно комбинировать друг с другом, образуя длинные цепи, называемые «полипептидными», из которых состоит одно из главных структурных веществ всего живого (белок). На рис. 7 показана структура белка, состоящего из линейной последовательности аминокислот; R_1, R_2, R_3, R_4 обозначают различные группы атомов, но «основа» всегда одинакова. Каждый белок имеет специфическое расположение функциональных групп (R-групп), по крайней мере в современных организмах.

В последние годы биохимик Фокс показал, что некоторые из простых аминокислот в условиях, которые он назвал «добиологическими», могут быть превращены в белковоподобные вещества [17]. Он взял смесь 18 или 20 аминокислот, нагрел их в расплавленной глутаминовой кислоте до точки кипения воды и получил аминокислоты, сцепленные последовательно друг с другом, т. е. полипептиды.

Современные живые организмы построены из огромного числа этих длинных полипептидных цепей, каждая из которых имеет специфическое строение. Это необходимо уточнить, поскольку одна из наших главных задач —

Рис. 7. Структура белка. Простые структуры; разнообразие химических свойств.

определить, как достигается этот порядок. Длинные полипептидные цепи скручены особым образом, образуя так называемую альфа-спираль, и такое скручивание является результатом того, что все полипептиды имеют некоторые общие для них структурные элементы. Водо-

родная связь в альфа-спирали при соответствующем взаимном расположении атомов углерода и азота определяет внутреннюю структуру молекулы белка. Этот белок представляет собой один из типов макромолекул (гигантских молекул), который, как мы теперь знаем, может быть получен при случайных процессах, химическом отборе и выявлении внутренней структуры.

Из других веществ, приведенных в схеме 1, одно — сахар (целлюлоза) и еще одно — жир (липид), не являются (по крайней мере на данном этапе наших знаний) основными при эволюции живых форм. Основными являются два вещества: белок и четвертое соединение — нуклеиновая кислота, которая построена из гетероциклических оснований и сахаро-фосфатных молекул, связанных вместе в длинную цепь.

СТРУКТУРА АМИНОКИСЛОТ

На рис. 8 показана структура нуклеиновых кислот. Обведенные кружками атомы образуют основные молекулы — тимин, аденин, цитозин и гуанин. Они скрепляются водородными связями. С внешней стороны этих оснований находятся молекулы сахара, вытянутые вдоль и связанные фосфатными группами. Они представляют как бы две ленты, связывающие вместе концы набора игральных карт. Если эти ленты скрутить, то игральные карты, вместо того чтобы лежать в плоскости, повернутся набок и уложатся штабелями. И действительно, при определенных условиях в водном растворе плоские молекулы укладываются штабелями. Эти молекулы располагаются так самопроизвольно при соответствующих условиях; это — явление молекулярной кристаллизации. На рис. 9 показано, каким образом это происходит: там видны две ленты и водородные связи, скрепляющие пары оснований (карт) вместе. Плоскости карт расположены параллельно друг другу. Существен именно этот длинный самопроизвольно образованный ряд оснований, так как теперь мы располагаем данными, подтверждающими строение, показанное на рис. 10 [18]. Порядок, в котором располагаются эти четыре основания (тимин, аденин, цитозин и гуанин), видимо, содержит важнейшую информацию,

ход которой еще неизвестен, о формировании современных организмов. Одной из важнейших проблем сегодняшней биохимии является объяснение связи между порядком

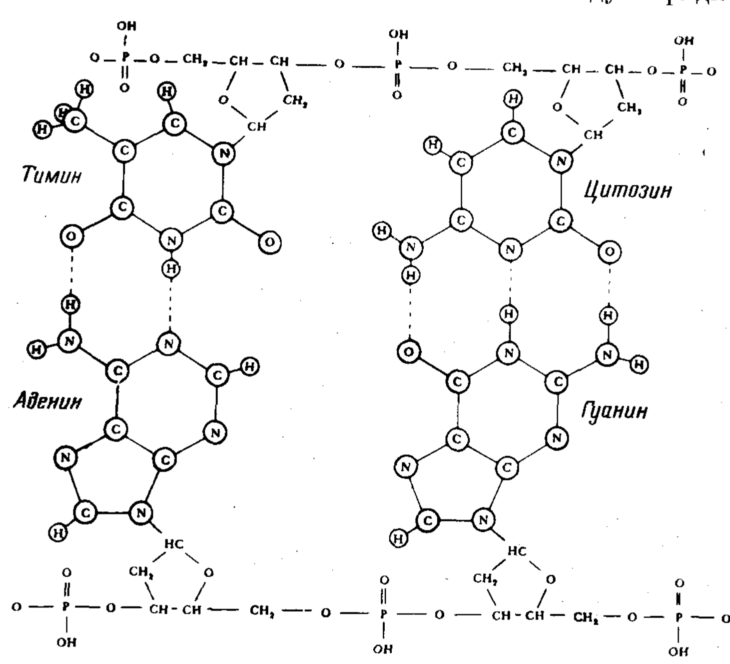


Рис. 8. Молекулярная схема компонент дезоксирибонуклеиновой кислоты.

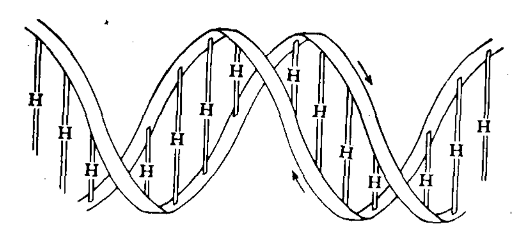


Рис. 9. Модель двойной спирали ДНК.

расположения оснований в линейной цепи нуклеиновой кислоты и характером расположения аминокислот в линейной белковой цепи.

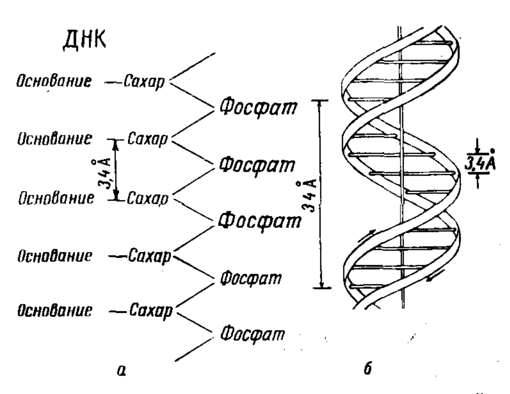


Рис. 10. Расположение оснований и сахаро-фосфатных цепей в ДНК по Ватсону и Крику. *а* — химическая формула одной цепи дезоксирибонуклеиновой кислоты; *б* — чисто схематическое изображение. Две ленты символизируют две сахаро-фосфатные цепи, а горизонтальные полоски — пары оснований, связывающие эти цепи. Вертикальная линия отмечает ось.

ОТ ХАОСА К ПОРЯДКУ

Для того чтобы восстановить последовательность событий, которые могли бы привести к современным живым организмам, мы должны разрешить не только проблему связи между линейным расположением аминокислот и линейным расположением оснований в генетическом веществе, определяющей, каким будет организм, но также и то, как возникла эта связь. Совершенно ясно, что эти две структуры тесно связаны, и представления о том, как шла эволюция, если мы отчетливо представим себе механизм этой эволюции, может дать нам ключ к тому, что же представляет собой эта связь.

Необходимо отметить следующие существенные особенности: структура нуклеиновой кислоты есть нечто, определяемое ее компонентами, а структура ее компонент — нечто, зависящее от химических свойств четырех атомов, из которых составлены эти компоненты: углерода, водорода, азота и кислорода.

Таким образом, мы уже представляем себе путь от самих атомов с их химическими свойствами через молекулы по крайней мере к гигантским молекулам, из которых построена живая материя. Однако мы еще не разобрались в процессах построения из этих гигантских молекул организованных клеток, которые уже наблюдаемы. Эти гигантские молекулы видеть не удается: они намного мельче структурных элементов клетки, показанной на рис. 1. Теперь зададим вопрос с точки зрения теории эволюции. Каким образом эти гигантские молекулы формируются в наблюдаемые структурные элементы?

Я полагаю, что эта организация является процессом кристаллизации, и по рис. 11—14 мы можем проследить эту кристаллизацию от малых молекул к большим. На рис. 11 показана тенденция к упаковке молекул антрацена; шары представляют собой отдельные атомы, а группы этих шаров — отдельные молекулы. Они стремятся к возможно более плотной упаковке. На рис. 12 показана структура агрегатов молекул красителя (цианина), которые не выпадают из раствора в виде кристаллов. Даже в очень разбавленном водном растворе эти системы стремятся выравняться, располагаясь своими плоскими гранями параллельно друг другу, подобно колоде карт [19]. Это происходит без какой-либо помощи со стороны «ленты», которую имеет нуклеиновая кислота. Такие структуры красителей самопроизвольно образуются в очень разбавленных растворах. Таким путем мы проникаем в структурные законы, которым подчиняется организация интересующих нас молекул [20].

На рис. 13 показан кристалл растительного белка. Маленькие шарики — отдельные молекулы белка; когда они выпадают из раствора, то располагаются упорядоченными рядами. Они выпадают не случайно, а располагаются весьма специфическим образом [21].

Наконец, давайте исследуем еще один тип молекулы — длинное волокно, которое представляет собой молекулу коллагена, показанную на рис. 14. Вверху видны характерные для коллагена волокна, отделенные друг от друга. Если в содержащий их раствор добавить немного соли, то эти молекулы белка перегруппируются, образуя фибриллы, которые очень похожи на естественные фибриллы

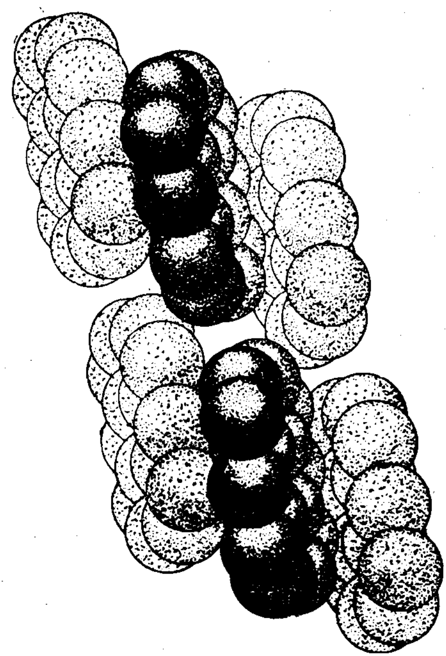


Рис. 11. Упаковка плоских молекул в структуру антрацена.

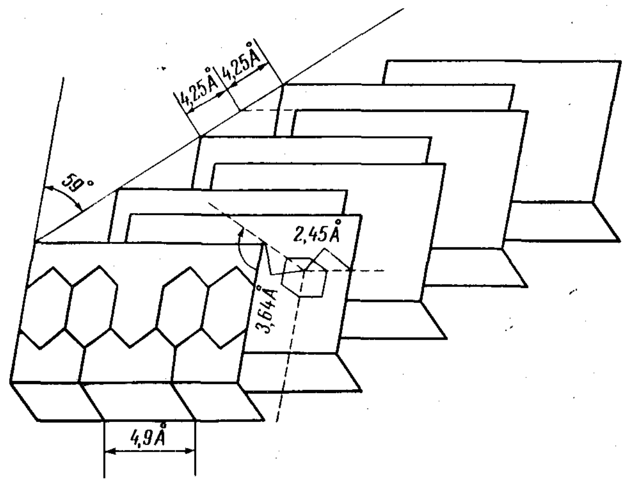


Рис. 12. Объединение молекул цианинового красителя в растворе.



Рис. 13. Электронная микрофотография кристалла растительного белка (вируса).

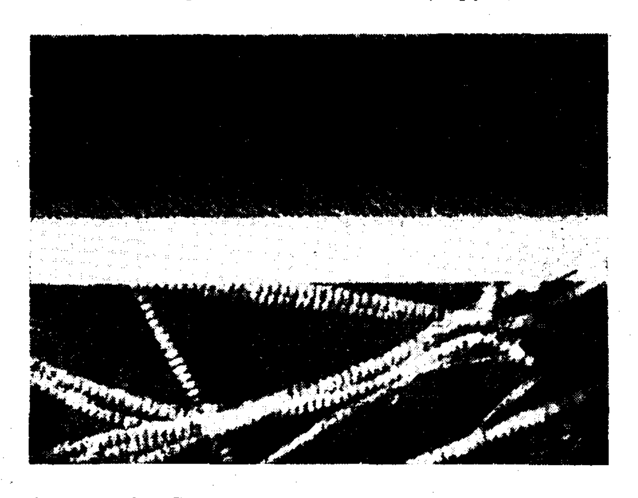


Рис. 14. Строение коллагена. *Вверху* — волокна коллагена — белка, который обычно находится в длинных фибриллах, растворены в разбавленной уксусной кислоте. Эта электронная микрофотография с увеличением в 75 000 раз. *Внизу* — фибриллы коллагена, самопроизвольно образовавшиеся из волокон, показанных сверху, при добавлении в разбавленную уксусную кислоту 1% хлористого натрия. По внешнему виду эти длинные фибриллы напоминают фибриллы нерастворенного коллагена.

коллагена. Эти перегруппированные фибриллы, образованные из растворенного коллагена, показаны внизу. Итак, даже макромолекулы должны обладать некими элементами структуры; R-группы, расположенные с одной стороны спирали в некотором порядке (см. рис. 7), включают какой-то элемент, который создает тенденцию к объединению в характерном порядке.

Таким образом, мы проследили путь от атомов, через случайный синтез к упорядоченному синтезу, до макромолекул и, в конце концов, к структурам, которые можно увидеть. Но это все еще не объединяет вещество. Правда, эти соединения при определенных условиях будут выпадать из раствора в виде осадка. Но они не приводят как внутри, так и вне себя к отделенному от окружающего пространства типу структур, различимых в красных кровяных шариках на рис. 1 и являющихся одним из существенных свойств живых клеток. Вне нашего внимания осталась стенка клетки, мембрана, которая отделяет клетку от окружающей среды.

КОНЦЕНТРАЦИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ—ОБРАЗОВАНИЕ КЛЕТКИ

Всем знакомы пленки масла на воде и разводы на них, возникающие при дуновении ветра. Такие явления можно воспроизвести в лаборатории. Если масляная пленка лежит на слое белка, то пленка особенно легко скатывается и образует капельки, иногда с воздухом внутри, а иногда с водой. На рис. 15 вверху показана масляная пленка, лежащая на пленке белка поверх воды. В центре показан процесс распада, который приводит к образованию водяных тел, окруженных пленкой (внизу). Этот опыт иллюстрирует тот факт, что для получения защитных оболочек служат физико-химические механизмы [22]. Однако это не единственный путь для концентрации вещества.

Можно взять слаборазведенный раствор синтетического полимера поливинилсульфокислоты и, добавляя в него незначительное количество железа, добиться разделения вещества на масляные капли, содержащие в себе все железо. И красные масляные капли и слой воды состоят в основном из воды [23]. Это — коацервация, другой процесс, который считался основным процессом, приводящим к образованию местной концентрации и клеточных структур [6]. Это явление зависит от свойства гигантских молекул в водных растворах выпадать из слабого водного раствора в относительно более концентрированную фазу — капельки, взвешенные в более слабом водном растворе. Эта гипотеза активно использовалась,

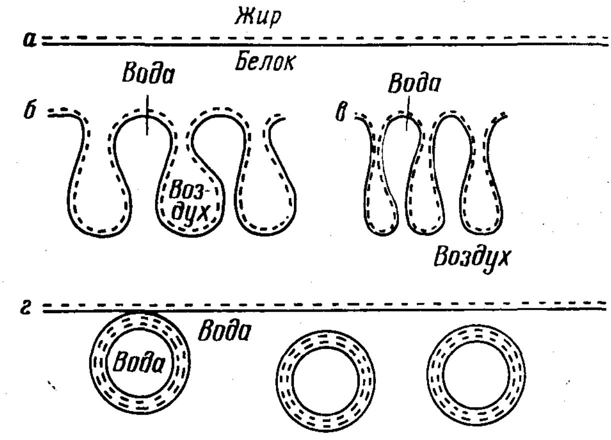


Рис. 15. Образование капель при распаде пленки [22].

в особенности в Институте биохимии Академии Наук СССР им. Баха; периодически публиковались результаты экспериментов, в которых гипотеза коацервации испытывалась различными способами [8]. Кроме того, гигантские молекулы имеют тенденцию упаковываться в упорядоченные ряды благодаря собственной упорядоченной структуре. Это одна из областей, в которой еще многое нужно сделать, чтобы точно выяснить условия, при которых происходят подобные явления.

СВЯЗЬ ВИДИМОЙ И НЕВИДИМОЙ СТРУКТУР

На рис. 16 показана электронная микрофотография вируса табачной мозаики (ВТМ). Палочки представляют собой целостные вирусные частички, которые при нанесении на растение табака повреждают листья и вызывают типичные проявления болезни. Этот организм — назовем его так — не является организмом в том смысле, с кото-

рым мы имеем дело в клетках на рис. 1 (у него нет ни клеточной оболочки, ни ядра), но он обладает двумя существенными свойствами: содержит нуклеиновую кислоту и белок и способен 1) воспроизводить самого себя и 2) видоизменяться при определенных обстоятельствах. Таким образом, он обладает некоторыми свойствами, которые мы требуем для живого организма. Это вещество



Рис. 16. Естественный вирус табачной мозаики (ВТМ).

можно разделить на белок и нуклеиновую кислоту при соответствующем химическом воздействии. Если белковая часть, лишенная нуклеиновой кислоты, надлежащим образом выделена в соляном растворе, то она снова образует палочки, так как белок содержит необходимые для этого структурные элементы, точно так же, как коллаген. На рис. 17 показан реконструированный белок ВТМ без нуклеиновой кислоты. Палочковая структура действительно видна, но длина палочек различна. Другими словами, реконструированный белок ВТМ не имеет генетической информации о необходимой длине палочек. Наконец, если мы теперь возьмем белковую компоненту ВТМ, которая дает палочки различной длины, и добавим в нее очень небольшое количество нуклеиновой кислоты, то получим

реконструированное вещество, показанное на рис. 18. Здесь мы видим частицы ВТМ, которые снова имеют определенный размер. Они «знают», помимо многого другого, какую длину им надлежит иметь, так как содержат генетический код.

Совершенно ясно, что обе эти структуры, белок и нуклеиновая кислота, необходимы для получения правильной



Рис. 17. Реполимеризованный белок ВТМ.

полной структуры палочки ВТМ. Законченная структура образуется при взаимодействии этих двух элементов; это, в сущности, и есть явление молекулярной кристаллизации.

Вопрос об эволюции может быть поставлен так: что образуется сначала, белок или нуклеиновая кислота? Если бы мы могли на него ответить, то получили бы ключ к проблемам современной биохимии. До сих пор я рассматривал пути спонтанного образования аминокислот и белков, ничего не говоря пока о спонтанном образовании оснований, которые необходимы для образования нуклеиновых кислот. Возможно, при путешествии на Венеру мы выясним, что́ из них образовалось первым. Если Венера нахо-

дится на более ранней стадии эволюции, то мы смогли бы выяснить, что является доминирующим веществом, белок или нуклеиновая кислота.

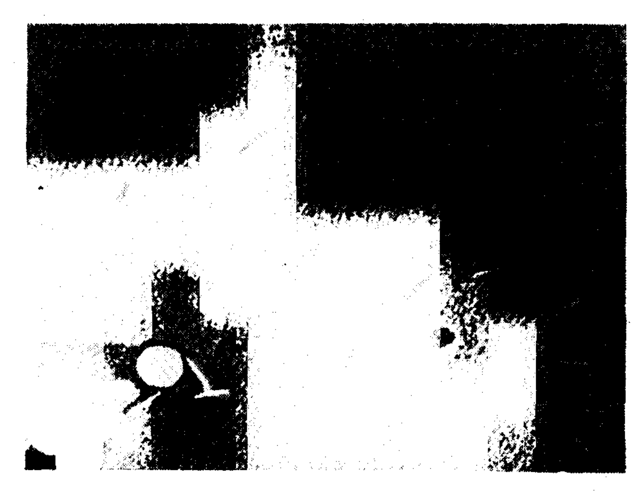


Рис. 18. Реконструированный белок ВТМ и нуклеиновая кислота.

II. Происхождение жизни на Земле и на других мирах

Мы проследили последовательность химических и физических процессов, которые могли бы привести нас от примитивных молекул первобытной Земли через множество этапов к тому, что большинство из нас называет жизнью. В этой эволюционной цепи появились два химических вещества, являющихся наиболее характерными и наиболее активными; оба они необходимы для обеспечения того, что мы рассматриваем как существенные свойства живого организма. Этими двумя субстанциями, этими двумя типами органического вещества были белок и нуклеиновая кислота (схема 2). Белки построены из последовательности аминокислот, представленных на схеме в виде цепочки пептидов; каждая из R-групп представ-

ляет собой особый набор атомов. С другой стороны, нуклеиновые кислоты являются последовательностью или цепочкой атомов, состоящей из оснований, обозначенных буквами (четыре различных типа оснований здесь обозначены четырьмя буквами A, C, T и G). Эти основания связаны через молекулу сахара и атом фосфора с другой молекулой сахара, с другим основанием, другим атомом фосфора и т. д.

Видимо, эти две молекулы образуют два вида основного структурного материала, который необходим для того, чтобы придать комплексам органического вещества свойства живых организмов. Среди этих свойств была способность к самовоспроизведению; это свойство передано веществу последовательностью оснований нуклеиновых кислот. Только определенные основания могут комбинировать друг с другом: A должно образовывать пару только с T, а C — только с G. Таким образом, можно построить некоторым, пока еще невыясненным путем другую цепь нуклеиновой кислоты, дополнительную к первой, у которой A соответствовало бы T, а G — C, для образования еще одной спирали, которая должна была бы дополнить первую спираль и таким путем, построить систему-копию. Прибавим к этому, что нам необходима переменность химических свойств, которую может обеспечить белок благодаря огромному числу различных R-групп: кислот, оснований, нейтральных и ароматических групп. Все эти типы химических свойств могут быть обеспечены двадцатью (или около того) R-группами, которые входят в состав белка.

Белок

CO_2H
H—C—R_1
NH
C=O
H—C—R_2
NH
C=O
H—C—R_3
NH
C=O
H—C—R_4
NH_2

Нуклеиновая кислота

A — *Сахар*
P
C — *Сахар*
P
C — *Сахар*
P
T — *Сахар*
P
G — *Сахар*
P
G — *Сахар*

Схема 2

Структура белка и нуклеиновой кислоты.

Более того, теперь мы знаем, что группа оснований, которая входит в состав нуклеиновой кислоты, как будто содержит код со всеми необходимыми данными (информацией) для построения всех белков в живом организме. Представляется, что по крайней мере в простейших случаях имеется свидетельство о связи между последовательностью оснований в нуклеиновой кислоте (*A*, *C*, *G*, *T*) и первичной последовательностью тех *R*-групп, которые входят в состав белка. Это— один из фронтов современной биохимии.

УСЛОВИЯ, ПРЕДШЕСТВОВАВШИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Зная сегодня, что имеется тесная связь между белком и нуклеиновыми кислотами, зададим вопрос: Как могла возникнуть подобная связь в процессе эволюции? Что появилось первым — нуклеиновая кислота или белок? Наши первые эксперименты, предназначенные для проверки возможности построения «сырья», из которого образуются гигантские молекулы, показали, что мы можем при помощи случайных процессов получить сахар и отдельные аминокислоты [11]. Эти эксперименты не продемонстрировали случайного образования чего-то такого, что можно было бы назвать или отнести к таким нуклеиновым основаниям, которые, видимо, играли важную роль в процессе первоначальной организации и хранении информации для воспроизведения. Но новые лабораторные эксперименты пролили свет на решение проблемы возможной последовательности при развитии этих двух субстанций (белков и нуклеиновых кислот).

На рис. 7 и 8 показаны структуры белка и нуклеиновой кислоты. Хотя основная структура белка обусловлена расположением *R*-групп, его дополнительным свойством является тенденция к свертыванию в спиральную структуру с помощью тех же самых атомов, из которых он состоит. Эту спиральную структуру определяют расстояния между связями и направления, характерные для атомов, входящих в его состав. Это в свою очередь приводит к еще более высокой степени упорядоченности и, в конце концов, к той организации, которую мы видим у живых организмов.

На рис. 8 показана основная структура «единиц», которые входят в состав нуклеиновой кислоты. Основание, например аденин, имеет в структуре кольцо, содержащее четыре атома углерода и два атома азота, входящее в состав другого кольца, состоящего из трех атомов углерода и двух атомов азота, окруженных некоторым числом атомов водорода. Еще одна структура обозначена буквой *C* для цитозина, следующая, *G*,— для гуанина и *T* — для тимина. На рис. 8 показаны также способы их специфического соединения. Аденин, например, не может соединяться с цитозином, а гуанин — с тимином. Это явление приводит к специфичности воспроизведений порядка оснований в цепи и является одной из важнейших особенностей нынешних живых организмов. Свойство воспроизводить самого себя почти тождественно, но не совершенно точно представляет собой важнейшую особенность живого вещества. Кроме оснований, в нуклеиновых кислотах имеется молекула сахара (5-углеродный сахар), а между молекулами сахара — фосфатный радикал, который связывает молекулы сахара. Такая структура создает сахаро-фосфатные ленты, скрепляющие цепи нуклеиновых кислот.

Теперь спросим: можем ли мы воссоздать эти основания нуклеиновых кислот? На рис. 3 показано, что если мы возьмем смесь того, что, как мы полагаем, являлось первоначальной смесью молекул земной атмосферы — вода, метан, водород и аммиак (верхний ряд на рис. 3),— и с помощью подходящих процессов высокой энергии разложим ее, то атомы снова объединятся хаотическим образом и среди вновь образовавшихся веществ будут молекулы нижнего ряда рис. 3, включающие аминокислоты. Заметим, что не существует никаких данных, по крайней мере в первых экспериментах, об образовании оснований, которые существенны для построения нуклеиновой кислоты. Это может навести на мысль, что эволюция сначала приводит к образованию белка и позже, в результате каких-то процессов,— к нуклеиновой кислоте [24, 25] [1]).

[1]) Теория о возникновении нуклеиновых кислот прежде аминокислот на первобытной Земле высказана Фоксом, а теория появления нуклеиновых кислот до аминокислот на первобытной Земле выдвинута Горовицем.

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Пересмотр источников энергии, которые можно было бы использовать для расщепления молекул, приводит нас к заключению, что принимавшийся ранее первичный источник энергии — ультрафиолетовое излучение, падающее на верхнюю атмосферу,— был не единственным и даже не главным источником энергии, разрушающим эти молекулы. Другим важным источником могла быть радиоактивность земной коры, особенно в виде радиоактивного K^{40}. В табл. 1 приведен ряд источников энергии, по-видимому, достойных упоминания, а также энергия их излучения, которая достаточна для диссоциации первичных молекул и начала процесса химической эволюции на Земле.

Источники необходимой энергии были разнообразными, прежде всего ультрафиолетовое излучение, разряды молний и радиоактивность. Распад K^{40} обеспечивал на поверхности Земли поток энергии $1 \cdot 10^{20}$ *кал/год*; ультрафиолетовое излучение с длиной волны меньше 1500 Å (очень жесткое излучение, в настоящее время совершенно не достигающее земной поверхности) дает $0{,}08 \cdot 10^{20}$ *кал/год*; ультрафиолетовое излучение короче 2000 Å — 4,5 (тех же самых единиц) и ультрафиолетовое излучение короче 2500 Å,— 30, молнии — 0,05.

Таблица 1

Энергии, необходимые для синтеза органических соединений [26]

Источник энергии	Энергия, 10^{20} *кал/год*
Распад K^{40} в земной коре	
в настоящее время	0,3
$1{,}3 \cdot 10^{9}$ лет назад	0,6
$2{,}6 \cdot 10^{9}$ лет назад	1,2
Ультрафиолетовое излучение,	
длина волны < 1500 Å	0,08
< 2000 Å	4,5
< 2500 Å	30
Молния	0,05

Первые эксперименты, результаты которых показаны на рис. 3, проводились с электрическими разрядами (тем же самым источником энергии, что и молнии). Попытка использовать ультрафиолетовый свет в области 2000—2500 Å оказалась безуспешной [27]. Этот свет не поглощается CH_4, H_2 или H_2O.

Таким образом, в качестве основной компоненты излучения всех источников энергии, обеспечивающих энергию расщепления первичных молекул для образования более сложных структур, остается излучение K^{40} на поверхности Земли.

СИНТЕЗ ОСНОВАНИЙ НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ В ПЕРВОБЫТНЫХ УСЛОВИЯХ НА ЗЕМЛЕ

В течение нескольких последних месяцев мы предприняли попытку провести эксперимент, в котором использовалось бы что-то похожее на излучение K^{40}, представляющее собой электроны высокой энергии. Мы бомбардировали ими смесь газов, которые, как мы полагаем, составляли первичную атмосферу у поверхности Земли. Мы хотели посмотреть, какие вещества при этом образуются.

Среди обнаруженных веществ было соединение, которое ожидалось: синильная кислота HCN [28]. Это вещество не было неожиданным по двум причинам: во-первых, оно является довольно устойчивым и образуется в разреженной газовой среде и, во-вторых, оно очень распространено во Вселенной, особенно в кометных хвостах. Когда комета приближается к Солнцу, свет его нагревает кометные газы и заставляет их светиться. Свет, излучаемый этими газами, говорит нам, что эти газы содержат, помимо других веществ, большое количество такого соединения атомов водорода, углерода и азота, как HCN. Мы нашли в смеси, которую мы бомбардировали электронами, много HCN, но более важным было то, что мы извлекли из смеси основания, которые необходимы для построения нуклеиновых кислот.

Уже обнаружено, что если HCN поместить в крепкий водный раствор аммиака (последний, как мы полагаем, находился в первичной атмосфере; это следует

из того, что он присутствует на больших планетах нашей солнечной системы), то образуется аденин [30—36]. На рис. 19 и 20 видно, что молекула аденина, одного из наиболее важных оснований, составлена просто из соединенных вместе пяти молекул HCN. На рис. 20 показано, как соединяются 3 молекулы HCN, образуя аминомалононитрил, который выделяется из смеси, и затем

Аминоимидазолкарбоксамид *Аденин*

Рис. 19. Синтез аденина в естественных земных условиях.

после серии других реакций, добавляется четвертая молекула HCN и получается соединение аминоцианоимидазол, продукт гидролиза которого является в настоящее время промежуточной стадией при образовании оснований (рис. 19). При добавлении еще одной молекулы HCN образуется аденин. Это исследование было проведено в 1962 г. С тех пор из раствора HCN в аммиаке были выделены другие основания, но аденин является одним из четырех наиболее важных гетероциклических оснований, из которых построены нуклеиновые кислоты.

Таким образом, электронная бомбардировка (и даже молния) может создавать значительное количество HCN и аденина, а также других оснований [28].

Из наших экспериментальных данных можно сделать дальнейшие выводы. Если метан, аммиак, воду и водород подвергнуть ионизующему облучению, которое расщепит эти молекулы, то из первичной смеси возникнут самые разнообразные соединения. Можно было бы предположить, что эти соединения будут чисто случайными, но это не так. Атомы обладают определенными свойствами,

зависящими от их электронной структуры, и они не соединяются совершенно случайным образом, а образуют лишь определенные соединения. Мы знаем это благодаря той методике, которой пользуемся в нашей лаборатории.

Вместо того чтобы просто пропустить электроны с энергией 5 *Мэв* через первичную смесь газов и затем исследовать эту смесь обычным химическим методом

Амино-малононитрил

Аминоцианоимидазол

Рис. 20. Синтез промежуточных соединений от HCN до аденина.

(выделяя сахар, основания, HCN, аминокислоты, нейтральную субстанцию), мы искали такой метод, который позволил бы выявить все вещества, в которые вошел углерод из метана, не зная заранее, что́ они собой представляют. Единственный способ проследить за углеродом состоит в том, чтобы использовать атомы углерода, которые могут быть найдены независимо от того, во что они превратились, а именно использовать радиоактивный углерод (C^{14}). Мы взяли метан с углеродом C^{14} и пропустили через смесь этого «меченого» метана, воды, аммиака и водорода электрический разряд. Затем мы взяли водный раствор, содержащий продукты этой бомбардировки, и поместили его на лист фильтровальной бумаги (метод, называемый «хроматографией на бумаге»).

На рис. 21 показаны результаты одного из этих опытов. Мы взяли немного получившегося вещества и положили его на уголок листа фильтровальной бумаги и затем по этой бумаге пустили растворитель (воду и фенол) таким образом, чтобы он переносил смесь, находящуюся на уголке бумаги, параллельно нижнему краю листа

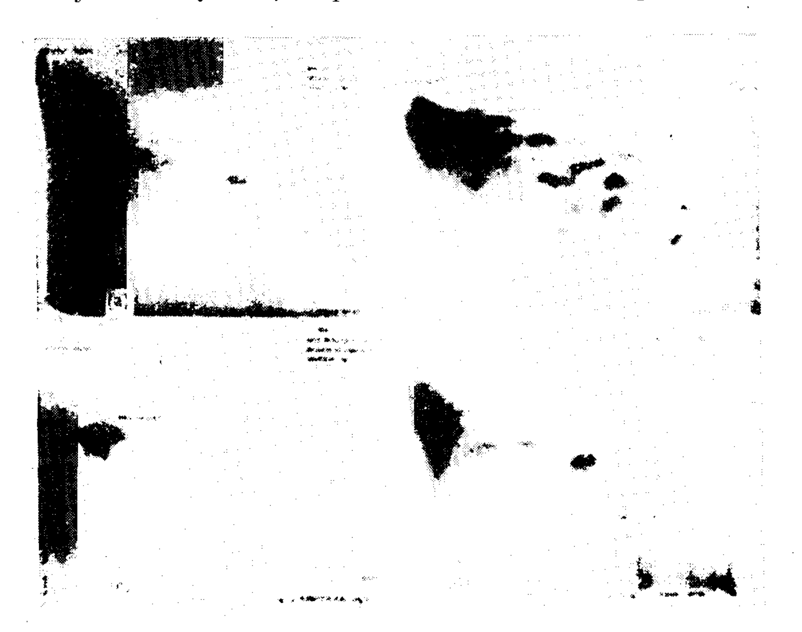


Рис. 21. Радиоаутограммы бумажных хроматограмм метана, облученного электронами с энергией 5 *Мэв*. Радиоаутограммы свидетельствуют об образовании множества соединений.

бумаги. Затем бумагу высушили и пропустили по ней другой растворитель (бутанол : пропионовая кислота : вода) в направлении, перпендикулярном первому, и соединения, которые первоначально перекрывались, были разделены. Для обнаружения соединений на фильтровальной бумаге к ней прикладывался кусок фотографической пленки; в тех местах, где имеется радиоактивное соединение, фотопленка чернеет. На рис. 21 приведены фотографии этих пленок: там, где на пленке видно черное

пятно, находится какое-либо соединение, содержащее радиоактивный углерод. Мы можем судить о природе этого соединения по тому месту на пленке, где оно возникает. Этот метод получил название «радиоаутографии».

На рис. 21, *а* показаны все виды радиоактивных соединений, получившихся в результате одной бомбардировки. Бóльшая часть вещества «смазалась»; оно не разделилось на отдельные соединения, но примерно дюжина их действительно выделилась. На рисунках 21, *b* — *d* изображены радиоаутографии хроматограмм различных соединений в смеси после предварительного

Таблица 2

Отождествление соединений, полученных при облучении метана содержащего C^{14}, аммония и воды

Опыт M22	$^{14}CH_4$, NH_3, H_2O, $PH_3(NH_4PO_3)_x$	
Кислотная фракция	=45,5%	Разделение на смоле дауэкс 1 и 50
Основная фракция	=17,44%	
Неионизованная фракция	=21,3%	
HCN	=0,45% от всего	
Аденин	=0,203% от основной фракции	
	=0,034% от всего	
5-аминоимидазол-карбоксамид	=0,105% от основной фракции	
	=0,018% от всего	
Молочная кислота	=2,21% от кислотной фракции	
	=0,99% от всего	

Две другие неизвестные преобладающие кислоты (не включая молочную) составляют соответственно 29 и 17,8% от кислотной фракции.

Глицин	=0,2% от основной фракции	
	=0,03% от всего	
α-аланин	=1,07% от основной фракц.	
	=0,18% от всего	
Аспарагиновая кислота	=0,2% от основной фракции	
	=0,03% от всего	

Два неизвестных (не мочевина и не гуанидин) преобладающих основных соединения (положительный нингидрин) составляют 20,9 и 11,9% от основной фракции.

химического разделения. Мы смогли отождествить таким путем примерно полдюжины соединений, включая аденин, HCN, глицин, аланин, различные аминокислоты и сахара, некоторые жирные кислоты, некоторые гидрооксикислоты — те самые вещества, из которых построена современная живая материя (см. табл. 2). Одним из основных продуктов, образовавшихся в результате бомбардировки, является мочевина — важное биологическое вещество современной живой материи [29].

То что мы рассказали,— это не только рассказ о незаконченной работе. Эти, казалось бы, странные эксперименты с теми веществами, которые, как мы полагаем, составляли первичную атмосферу Земли, показывают, что при этом действительно образуются вещества, которые исключительно важны сегодня для всей живой материи. Это дает нам уверенность в том, что, продолжая эксперименты, мы будем все лучше понимать, каким образом на поверхности Земли могли появиться живые существа. Все зависит от того, насколько далеко мы можем продвинуться с экспериментами на Земле в нынешнее время.

ЖИЗНЬ НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ?

Возникает естественный вопрос: происходят ли подобные процессы где-либо еще — прежде всего в нашей солнечной системе, а также вне нашей солнечной системы? Я касаюсь только такого рода жизни, которая основана на углероде. Возможно, существуют и другие типы жизни, основанные на других элементах, а не на углероде, водороде, азоте, кислороде и жидкой воде, и можно вообразить себе такие системы. Мне кажется, что в настоящее время нам еще не стоит рассуждать об этих возможных формах и приравнивать их к тому, что мы определяем как «живое» в системе, состоящей из углеродных, водородных, азотных и кислородных атомов.

В одном из научных журналов недавно была опубликована анонимная статья под заглавием «Возможна ли жизнь на поверхности Земли?» Автор, предполагаемый обитатель Юпитера, приходит к заключению, что невозможна! Он исходит из того факта, что Юпитер имеет атмосферу, состоящую в основном из метана, и так как на поверхности Юпитера гораздо холоднее, чем на поверхности Земли, то вода должна там замерзнуть. Следовательно, в жидкой фазе должен находиться аммиак. Житель Юпитера заключает, что поскольку в земной атмосфере нет аммиака и там слишком тепло для того, чтобы жидкий аммиак находился на поверхности, то, следовательно, и жизнь не может зародиться на поверхности Земли. Именно такого рода аргумент мог бы привести житель Юпитера; и с его точки зрения это вполне резонно.

Я рассмотрю возможность землеподобной жизни, земной жизни, жизни, как мы ее знаем, где-либо еще в нашей солнечной системе. Это значит, что мы должны иметь вещества, которые, как мы решили, являются первичными на Земле, считать, что там протекают подобного же рода процессы, имеется тот же самый температурный режим и пр.

Этот вопрос уже сейчас не является полностью гипотетическим, и он станет полностью реальным тогда, когда мы в ближайшем будущем сможем получить определенную информацию по крайней мере о наших трех ближайших соседях по солнечной системе. Возможно, что мы получим ответ в ближайшие пять лет и, конечно, в пределах десяти лет.

Очевидно, что одним из наиболее удачных путей для получения ответа на этот вопрос была бы посылка кого-то или чего-то на Луну, на Венеру или на Марс, чтобы взять пробу, привезти ее обратно и исследовать в лаборатории. Тогда-то мы и узнаем, есть там что-нибудь живое или нет!

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МЕТЕОРИТАМИ

К счастью, куски вещества нашей солнечной системы постоянно прилетают к нам в виде метеоритов. Различные оценки количества выпадающих метеоритов колеблются от 350 000 *т* до 10 000 000 *т* в год [37]. Но даже число 5 000 000 *т/год* представляет собой порядочную величину. К сожалению, большинство их падает в океан.

Из этих метеоритов наибольшую группу по весу составляют железные метеориты, так как из-за своей прочности

они меньше разрушаются, легче разыскиваются и легче опознаются. Каменные метеориты распознать труднее, но они составляют наибольшую по численности группу среди падающих метеоритов. Однако среди каменных метеоритов лишь очень немногие содержат углерод; они называются *углистыми хондритами*. Из 900 каменных метеоритов, перечисленных в каталоге метеоритов на 1955 г., только 12 или 15 являются углистыми хондритами; другими словами, камни, содержащие значительное количество углерода, составляют 2—3% от общего веса каменных метеоритов.

В настоящее время считают, что метеориты попадают на Землю из пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера [38—40]. Любой метеорит представляет собой внеземное вещество, и его исследование дает нам возможность получить некоторое представление о том, на что похоже внеземное вещество. Известно огромное количество самых разнообразных анализов метеоритов [41, 42]. Но состав соединений углерода в углистых хондритах был мало исследован по двум причинам: во-первых, этих метеоритов немного, во-вторых, только недавно наши аналитические методы стали достаточно точными и тонкими для получения необходимых данных. Впервые полный анализ углистого хондрита Коул Баккевельд, который упал в 1838 г. в Южной Африке, был проведен в 1953 г. Мюллером. По растворимости и содержанию углерода углистое вещество оказалось похожим на углеводороды [44].

В 1950 г. углистый хондрит упал в Мюррее (Кентукки, США) [45]. Мы провели тщательное исследование содержания органических соединений в этом метеорите. Найдутся ли там признаки соединений, которые, возможно, образовались на первобытной Земле при конденсации атомов углерода и водорода в первоначальном скоплении пыли и газа, из которого сформировалась сначала солнечная система и Солнце, а затем все планеты, включая Землю?

Мы исследовали примерно половину имевшегося у нас куска метеорита Мюррей. Отдельные соединения еще не выявлены, но мы отождествили целые группы или классы веществ [46]. Например, нам удалось отождествить длинную цепь углеводородных соединений — воскоподобных или нефтеподобных молекул, содержащих от 10 до 12 атомов углерода, а также более длинные цепи. Вероятно, эти соединения имеют абиогенный источник [1]).

Однако более интересным является ответ на вопрос, поставленный в начале нашего обсуждения: присутствуют ли в кусках метеоритов какие-либо аминокислоты или гетероциклические основания? Наши первые опыты, которые должны были выяснить присутствие аминокислот в метеоритах, окончились неудачно. С другой стороны, куски метеоритов, найденные на Земле, обнаруживают некоторые вещества, которые поглощают свет подобно гетероциклическим основаниям. На рис. 22 воспроизведена микрофотография метеорита Мюррей. Он очень хрупкий, мягкий и ничем не напоминает земные горные породы.

Первым результатом исследования образца метеорита Мюррей было обнаружение инфракрасного поглощения органическим веществом, которое мы выделили из метеорита. Это показано на рис. 23, где также можно увидеть разнообразие углерод-водородных связей в этом экстракте. Минимумы этой кривой представляют собой поглощение света, указывающее на присутствие в этом веществе связей C — H. Имеется несколько различных видов связи C — H в образце, обнаруживаемых по ширине и сложности поглощения в области 2800 $см^{-1}$. Однако более интересен промежуток между волновыми числами 1650 и 1800. Эти минимумы соответствуют поглощению света определенных длин волн и позволяют нам утверждать,

[1]) Нэги, Майншайн и Хенесси опубликовали в марте 1961 г. результаты анализа углистого хондрита Оргей, упавшего во Франции в 1864 г., которые также подтверждают присутствие углеводородоподобных соединений в метеоритах [47]. Распределение обычного парафина в живых формах очень специфично. Углеводороды в живой материи вместо равномерной смеси показывают преобладание углеродных групп с нечетным числом атомов углерода (21, 23 и т. д.), в то время как содержание молекул с четным числом (20, 22, 24) атомов углерода низкое. Согласно этим исследованиям, метеоритные углеводороды тоже показывают повышенное содержание некоторых парафинов, содержащих нечетное число атомов углерода. Эти исследователи считают, что масс-спектрометрические исследования подтверждают возможность того, что эти вещества образовались в результате биогенных процессов, происходящих за пределами Земли, в областях, откуда приходят метеориты.

что в этом образце метеорита имеются молекулы с двойными углерод-кислородными связями и двойными углерод-азотными связями разных типов. Итак, метеоритное вещество — это не простая смесь, и в нем присутствуют именно те типы веществ, которые мы разыскиваем.

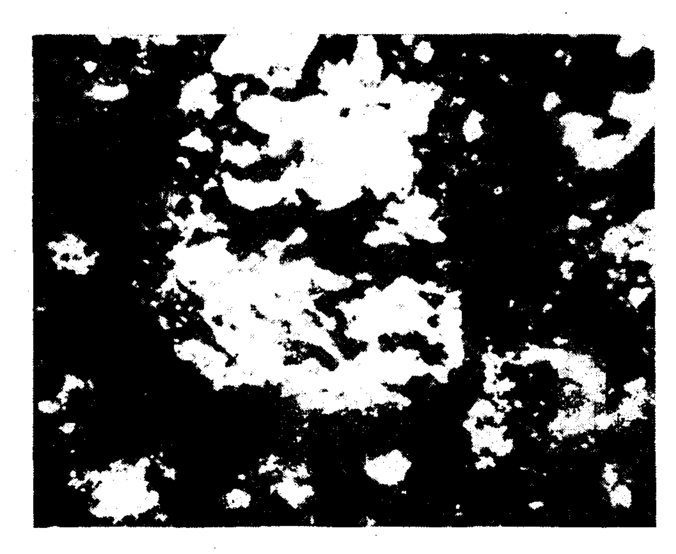


Рис. 22. Фотография метеорита Мюррей.

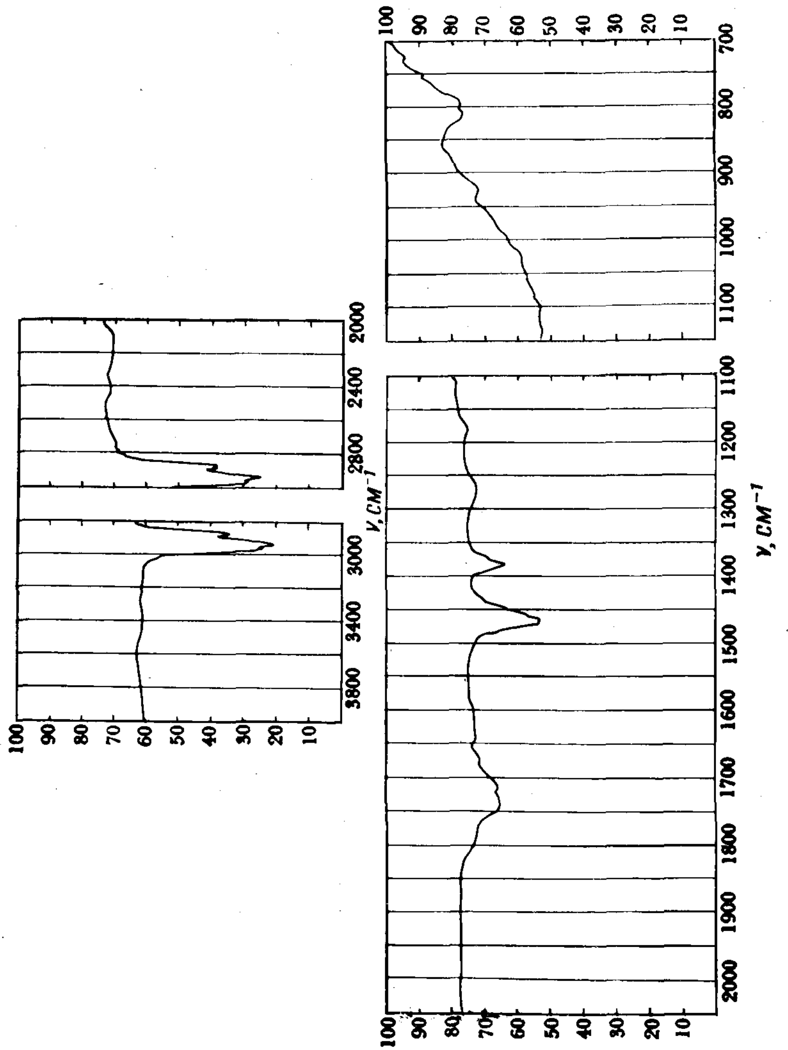
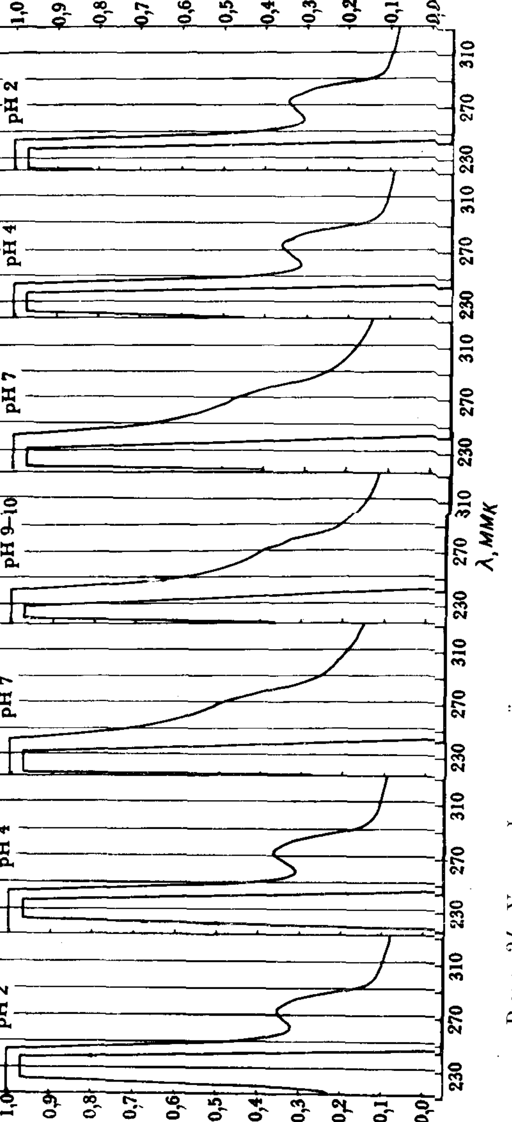


Рис. 23. Инфракрасный спектр четыреххлористого углерода, выделенного из метеорита Мюррей.

Особенно интересным было обнаружение поглощения света в другом конце спектра, в ультрафиолете (рис. 24). Здесь показано поглощение ультрафиолетового излучения и изменение этого поглощения в зависимости от кислотности раствора. Подобное изменение очень характерно для одного вида гетероциклических оснований, которые входят в состав нуклеиновых кислот, а именно цитозина. Я не утверждаю, что вещество, найденное в метеоритах,— это цитозин; я говорю, что его спектр поглощения очень похож на спектр поглощения цитозина. Очевидно, это свидетельствует о присутствии в метеоритах вещества, которое похоже на гетероциклические основания [1]).

[1]) Присутствие гетероциклических оснований было подтверждено также при исследовании метеорита Мокойи (M. H. Briggs, частное сообщение, 1961 г.)



Р и с. 24. Ультрафиолетовый спектр поглощения экстракта из метеорита Мюррей.

Все это наводит на мысль, что, возможно, подобное основание нуклеиновой кислоты могло образоваться до аминокислот. Я подозреваю, что они возникли вместе [48]; возможно, основания появились чуточку раньше. Сейчас мы не можем делать более сильных утверждений.

Если бы мы смогли слетать на Луну и собрать немного лунной пыли, захваченной при ее движении по межпланетному пространству, то мы смогли бы узнать, что́ накопилось под лунной поверхностью, защищенной как от радиации, так и от возможного влияния живых организмов [49—52]. Тогда мы смогли бы выяснить, какими были первичные органические молекулы в солнечной системе. Это — одна из причин, побуждающая нас лететь туда; и очень скоро мы это сделаем.

СООБРАЖЕНИЯ О ЖИЗНИ НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Давайте теперь проанализируем возможность жизни на двух наших ближайших соседях-планетах. Я полагаю, что на Луне нет жизни, так как у нее нет атмосферы [52]. Совершенно невероятно найти там какой-нибудь вид живой материи — за исключением случая, что он спрятан очень глубоко под поверхностью в каком-нибудь пока неизвестном нам месте. На поверхности Луны мы должны найти большие скопления углеродсодержащих веществ, подобные метеоритам; по-видимому, они тоже содержат примитивные органические соединения.

Из двух наших ближайших соседей Венера находится ближе к Солнцу, чем Земля, а Марс — дальше. На Венере должно быть теплее, чем на Земле; на Марсе же, находящемся дальше от Солнца, холоднее, чем на Земле, примерно на 10° С. До сих пор мы не имели возможности увидеть поверхность Венеры. Планета покрыта постоянным слоем облаков, и единственным веществом, отождествленным в ее атмосфере, является большое количество двуокиси углерода. По-видимому, там имеется вода, возможно, и другие вещества [53—55].

Марс по размерам значительно меньше Земли, и, конечно, поверхность его более холодная. Плотность его атмосферы гораздо меньше земной. Атмосфера содержит

небольшое количество CO_2, но заметного количества кислорода там не обнаружено, а воды очень мало. Однако Марс имеет полярные шапки, которые хорошо видны и которые изменяются в соответствии с марсианскими временами года. Марс был назван «красной планетой», так как наблюдателю некоторые области его кажутся красными. Фотографии же Марса показывают не действительные цвета планеты, а только оттенки серого. На Марсе имеются темные и светлые площадки. Интересно, что когда полярная шапка (считается, что это — ледяная шапка) тает или испаряется (так как атмосферное давление там мало), то кажется, что темные области перемещаются к экватору. Когда же полярная шапка вновь появляется, то темные области отступают обратно. Это перемещение наводит на мысль, что темные области заняты чем-то живым (скажем, лишайниками), что растет, а затем цветет при наличии небольшого количества влаги, приходящей от полярных шапок. Это — один из основных аргументов в пользу того, что на Марсе существует жизнь.

Возможно, более важными являются последние наблюдения Синтона, исследовавшего при помощи 200-дюймового телескопа темные и светлые области Марса [56]. Он наблюдал со спектрографом область спектра около 3,5 *мк*, которая соответствует поглощению света углеводородами. Ему удалось наблюдать по отдельности темные и светлые области, чтобы определить, есть ли какое-нибудь различие между ними в области спектра 3,5 *мк*. Он нашел, что темные площадки Марса показывают гораздо большее поглощение на 3,5 *мк*, чем светлые. Если это верно и если перемещения темных областей соответствуют временам года, то, следовательно, и углеводороды образуются и исчезают в соответствии с временами года на Марсе, точно так же как это происходит с земной жизнью при подобных же обстоятельствах. Возможно, на сегодняшний день это является наилучшим доказательством того, что на поверхности Марса имеется что-то живое.

Я думаю, что в течение ближайшего десятилетия мы получим четкий ответ на вопрос о наличии жизни на Марсе и Венере, а возможно, это произойдет и гораздо скорее.

ЖИЗНЬ В ДРУГИХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМАХ

Последний вопрос: какова вероятность того, что жизнь существует где-либо еще вне нашей солнечной системы? По причинам, упомянутым выше, я не делаю никаких предположений о других членах нашей солнечной системы. Такие планеты, как Юпитер и Меркурий, не могли бы поддерживать земной тип жизни, но они могли бы способствовать развитию некоего другого типа, что, однако, лежит вне рамок нашего обсуждения.

Давайте теперь рассмотрим пространство вне нашей солнечной системы. Здесь мы должны обратиться к двум типам данных: к гипотезам о происхождении солнечной системы и к статистике. Начнем с обычных представлений о происхождении нашей собственной солнечной системы и Галактики. Солнечная система образовалась в результате объединения пылевых частиц и газа под действием взаимного притяжения. Когда такая конденсация стала достаточно большой по размерам и ее температура очень высокой, образовались самосветящиеся тела, подобные Солнцу; когда же процесс аккерции ослаб и пространство было «выметено» так, что осталось мало свободного вещества вокруг самосветящихся тел, сформировались планетные тела, подобные нашей собственной солнечной системе. Отсюда можно сделать некоторые выводы относительно возможности существования земноподобных планет где-либо еще во Вселенной и об их числе.

Прежде всего необходимо определить число самосветящихся звезд. С помощью самого большого в мире 5-метрового телескопа было найдено, что число самосветящихся звезд, доступных наблюдению, достигает 10^{21}. В нашей солнечной системе число землеподобных планет равно одной из десяти возможных. Давайте примем эту цифру за количество землеподобных планет близ каждой солнцеподобной звезды, т. е. таких планет, которые находятся на подходящем расстоянии от их источника тепла, имеют подходящий размер, подходящую атмосферу с соответствующим химическим составом и испытывают все описанные выше изменения, как необходимую последовательность реакций, которая могла бы привести к живым субстанциям. Следуя Шепли [57], возьмем еще

более заниженные оценки, а именно предположим, что только одна звезда из тысячи имеет планеты и что только одна планета из тысячи подобна Земле. Делая еще несколько предположений, каждое из которых уменьшает искомое число еще в тысячу раз, окончательно получим 100 000 000 землеподобных планет в видимой Вселенной. Эта оценка сильно занижена, так как я был очень умерен в каждой оценке. В каждом случае я брал одну тысячную вместо одной десятой. По всей вероятности, можно считать, что в каждом случае имеется более одной планеты из тысячи. Таким образом, в видимой Вселенной имеется по крайней мере 10 000 000 планет, которые были очень похожи на Землю или похожи на нее в настоящее время. Из всех этих рассуждений следует вывод: мы не одиноки во Вселенной. Так как существование человека на Земле занимает лишь миг космического времени, несомненно, что на некоторых из этих 10 000 000 планет разумная жизнь далеко обогнала наш уровень.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ

Спрашивается, сможем мы или нет установить связь с этими разумными существами, характер которых мы не знаем и которые обитают в иных частях Вселенной [58, 59]? Это очень трудная задача. Прежде всего теория относительности налагает ограничение на скорость, с которой мы можем передавать информацию. Учитывая это, один из моих коллег, астроном, теперь работающий в Годдарском центре космических полетов, рассчитал, какая из звезд в радиусе 10 световых лет от Солнца должна иметь землеподобные планеты [60—62]. Он остановился на двух звездах, τ Кита и ε Эридана, что послужило поводом попытаться «послушать» эти две звезды. Это и есть проект «Озма» [63].

Процесс биологической эволюции длителен, а время человеческой эволюции внутри этой биологической эволюции очень коротко — миллион лет или менее (если вы хотите иметь дело с тем, что зовется человеком!) По сравнению с возрастом видимой Вселенной — это только миг. Поэтому весьма вероятно, что некоторые из землеподобных планет обогнали нас, а другие ушли не так

далеко в своей эволюции. Итак, можно ожидать, что где-то могут быть разумные существа, обогнавшие нас в познании и в силу какой-то причины передающие нам информацию. На эти две звезды были направлены радиотелескопы в надежде услышать какой-нибудь периодический сигнал. До сих пор ничего не слышно. Но эта работа продолжается только один год, а это очень короткий срок во времени эволюции.

МЕСТО ЧЕЛОВЕКА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Факт, к которому мы пришли в заключение,— что мы не одиноки во Вселенной,— заставляет нас по-новому взглянуть на пройденный путь и вновь оценить то место, которое жизнь занимает на Земле, в солнечной системе, в Галактике и во Вселенной. Если жизнь измерять в долях от полного числа атомов, непосредственно вовлеченных в процессы жизни, то роль ее не покажется значительной; гораздо существеннее воздействие на окружающий мир. Поверхность Земли полностью преобразована эволюцией живой материи, и она изменяется гораздо сильнее одной из последних форм этой живой материи — человеком. Я думаю, это придает жизни несколько иную перспективу, чем прежний взгляд, согласно которому Земля — лишь малая планета на краю одной заурядной галактики. Теперь, когда вы знаете, что жизнь существует в других местах во Вселенной, а не только на этой малой планете в маленькой галактике, отношение к жизни должно измениться. Жизнь очень глубоко изменяет те области, где она возникает [1]).

Теперь совершенно ясно, что у нас есть возможность взглянуть и в более близкое и в более далекое будущее. Я много думал об этом, и во время недавней поездки в Голландию увидел в кабинете профессора химии картину, поразившую меня тем, что она воспроизводила в художественной форме сущность моих представлений о природе эволюции и процессах жизни. Фотография этой картины воспроизведена на рис. 25. В центре — слово

[1]) Более полное обсуждение проблемы места человека на Земле и во Вселенной см. в [64].

Verbum — Бытие. По краям картины — небо днем и ночью; море и суша — тоже днем и ночью, а постепенно сливающиеся одна за другой фигуры и их превращения, которые

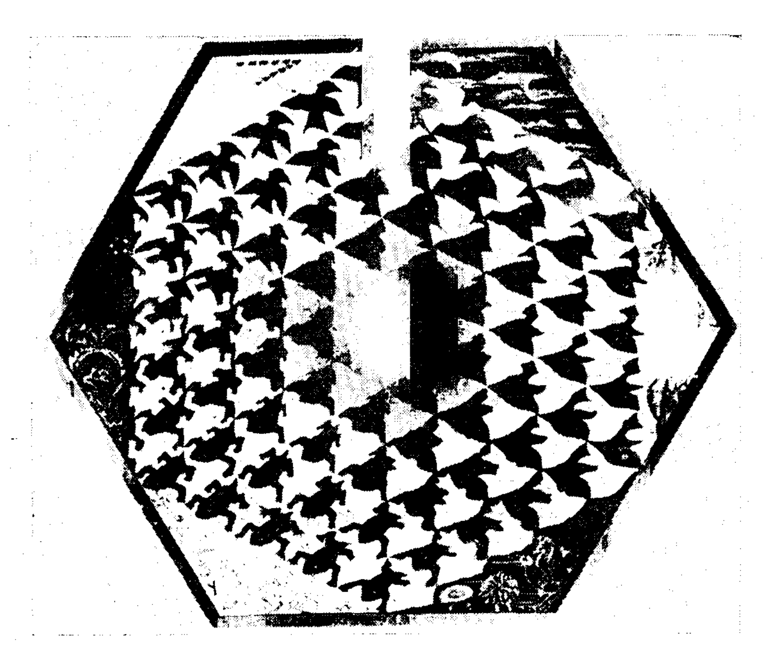


Рис. 25. Литография Эшера «Verbum» (Баарн, Голландия).

в конце концов становятся явными, как представляется мне, воспроизводят сущность не только жизни, но и всей Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Darwin C., Wallace A. R., J. Proc. Linnaean Soc. London (Zoology), 3, 45 (1858).
2. Wallace A. R., Неопубликованная рукопись, написанная в июне 1858 г. и включенная в более обширную статью Дарвина и Уоллеса (см. [1]).
3. Notes and Records of The Royal Society of London, 14, No. 1 (1959).
4. Winchell A., Sketches of Creation, Harper, New York, 1870.

5. Haldane J. B. S., New Biology, No. 16, Penguin, London, 1954.
6. Опарин А. И., Происхождение жизни, М., Воениздат, 1959.
7. Briggs M. H., Evolution, **13**, 416 (1959).
8. Опарин А. И., Возникновение жизни на Земле, Труды международного симпозиума, Москва, август 1957, 1959 гг. (дан обзор гипотез по происхождению жизни).
9. Gaffron H., Perspectives Biol. Med., **3**, 163 (1960).
10. Briggs M. H., Sci. Cult. (Calcutta), **26**, 160 (1960).
11. Garrison W. M., Hamilton J. G., Morrison D. C., Benson A. A., Calvin M., Science, **114**, 416 (1961).
12. Miller S. L., J. Am. Chem. Soc., **77**, 2351 (1955).
13. Miller S. L., Urey H. C., Science, **130**, 245 (1959).
14. Calvin M., Am. Scientist, **44**, 248 (1956).
15. Calvin M., Science, **130**, 1170 (1959).
16. Shemin D., Harvey Lectures, **50**, 258 (1954).
17. Fox S. W., Harada K., Vegotsky A., Experientia, **15**, 81 (1959).
18. Watson J. D., Crick F. H. C., Nature, **171**, 964 (1953).
19. Scheibe G., Zs. Electrochem., **52**, 283 (1948).
20. Calvin M., Natl. Lab. Symp., **11**, 160 (1958).
21. Wyckoff R. W. G., Labaw L. W., Exptl. Cell Res. Suppl., **3**, 395 (1955).
22. Goldacre R. J., Surface Phenomena in Chemistry and Biology, Pergamon Press, London, 1958, p. 278—298.
23. Millich F., Calvin M., Univ. Calif. Rad. Lab. Rep. UCRL-9519, Jan. 31, 1961, p. 4
24. Fox S. W., Science, 132, 200 (1960).
25. Horowitz N. H., Intern. Union Biochem. Biochemical Symp. Ser., 1, 106 (1960).
26. Swallow A. J., Radiation Chemistry of Organic Compounds, Pergamon Press, London, 1960, p. 244.
27. Groth W. E., Weyssenhoff H., Planetary Space Sci., **2**, 79 (1960).
28. Palm C., Calvin M., Univ. Calif. Rad. Lab. Rep. UCRL-9519, Jan. 31, 1961, p. 30.
29. Palm C., Calvin M., J. Am. Chem. Soc.
30. Oro J., Kimball A. P., Synthesis of Imidazoles and Purines under Primitive Earth Conditions, Abstracts of paper presented at the American Chemical Society Meeting, New York, Sept. 1960, Division of Biological Chemistry, Abstract 68, p. 25C.

31. Oro J., Kimball A. P., Arch. Biochem. Biophys., **94**, 217 (1961).
32. Oro J., Kamat S. S., Nature, **190**, 442 (1961).
33. Oro J., Biochem. Biophys. Res. Comm., **2**, 407 (1960).
34. Oro J., Guidry G., Nature, **186**, 156 (1960).
35. Oro J., Kimball A. P., Moser F., Arch. Biochem. Biophys., 85, 115 (1959).
36. Oro J., Kimball A. P., Arch. Biochem. Biophys., **94**, 217 (1961).
37. Pettersson H., Sci. Am., **202** (1960).
38. Mason B., Nature, **186**, 230 (1960).
39. Mason B., J. Geophys. Res., **65**, 2965 (1960).
40. Anders E., Goles G. G., J. Chem. Educ., **38**, 58 (1961).
41. Nininger H. H., Out of the Sky: Story of Meteoritics, Dover, New York, 1959.
42. Кринов Е. Л., Метеориты, М., Физматгиз, 1958.
43. Кринов Е. Л., Основы метеоритики, М., Гостехиздат, 1955.
44. Mueller G., Geochim. Cosmochim. Acta, **4**, 1 (1953).
45. Horan J. R., Meteoritics, **1**, 114 (1953).
46. Vaughn S. K., Calvin M., Proc. 1st Intern. Space Sci. Symp., Nice, France, 1960.
47. Nagy B., Meinschein W. G., Hennessy D. J., Ann. N. Y. Acad. Sci., **93**, 25 (1961).
48. Calvin M., Univ. Calif. Rad. Lab. Rep. UCRL-9440, Oct. 19, 1960; Ann. Internal Med., **54**, 954 (1961).
49. Lederberg J., Cowie D., Science, **127**, 1473 (1958).
50. Sagan C., Proc. Natl. Acad. Sci., **46**, 393 (1960).
51. Sagan C., Natl. Acad. Sci., Rep. 757 (в печати).
52. Anders E., Science, **133**, 1115 (1961).
53. Sagan C., Radiation Res., **15**, 174 (1961).
54. Sagan C., Astron J., **65**, 499 (1960).
55. Sagan C., Jet Propulsion Lab. Rep. JRP-TR-32-34, Sept. 15, 1960.
56. Sinton W. M., Science, **130**, 1234 (1959).
57. Shapley H., Of Stars and Men, Beacon Press, Boston, 1958. (Русский перевод: Шепли X., Звезды и люди, М., 1961.)
58. Freudenthal H., Lincos: Design of a Language for Cosmic Intercourse, North-Holland, Amsterdam, 1960.
59. Boehm G. A. W., Fortune, **63**, 144 (1961).

60. Su-Shu Huang, Astron. Soc. Pacific, **71**, 421 (1959); **72**, 106 (1960).
61. Su-Shu Huang S.-S., Am. Scientist, **47**, 397 (1959).
62. Su-Shu Huang S.-S., Natl. Aeronautics and Space Administration Rep. NASA TN-D-499, Sept. 1960.
63. Drake F. D., Sky and Telescope, **19** (1960).
64. Calvin M., Evolution, **13**, 362 (1959). Calvin M., Univ. Calif. Rad. Lab. Rep. UCRL-9005, Dec. 1959; Calvin M., in «Logic and Personal Knowledge», Routledge and Kegan Paul., London, 1960, p. 207.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

I. ОТ МОЛЕКУЛЫ ДО МИКРОБА

1. Haldane J. B. S., New. Biology, No. 16, Penguin, London 1954.
2. Опарин А. И., Происхождение жизни, М., Воениздат, 1959.
3. Опарин А. И., Возникновение жизни на Земле, Труды международного симпозиума, Москва, август 1957, 1959 гг.
4. Florkin M. (Ed), Some Aspects of the Origin of Life, Pergamon Press, London, 1961.
5. Эволюция: Symposium VIII of the Society for Experimental Biology (Great Britain), Cambridge University Press, New York, 1953.
6. Huxley J., Evolution in Action, Harper, New York, 1953; New American Library (paperback), 1957.
7. Blum H. F., Time's Arrow and Evolution, 2nd ed., Princeton University Press, 1955; Princeton (paperback), 1959.
8. Simpson G. G., Meaning of Evolution, Yale University Press, New Haven, 1949; rev. paperback ed., Yale, 1960.
9. Bernal J. D., The Physical Basis of Life, 1951.
10. Alexander J., Life, Its Nature and Origin, Reinhold, New York, 1948.
11. Schrodinger E., What is Life? Cambridge University Press, New York, 1945. (Русский перевод: Шредингер, Что такое жизнь с точки зрения физики? М., ИЛ, 1957.)
12. Pfeiffer J., Physics and Chemistry of Life, Simon and Schuster, New York, 1955.

II. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ И ВО ВСЕЛЕННОЙ

1. Shapley H., Of Stars and Men, Beacon Press, Boston, 1958; Washington, Square Press (paperback), 1960.
2. Hoyle F., Nature of the Universe, 2nd ed., Harper. New York, 1960.
3. Jones H. S., Life on Other Worlds, rev. ed., Hodder and Stoughton, London, 1960.
4. Urey H. C., The Planets, Yale University Press, New Haven, 1952.
5. Кринов Е. Л., Основы метеоритики, М.-Л., Гостехиздат, 1955.
6. Nininger H. H., Out of the Sky: Story of Meteoritics, Dover, New York, 1959.
7. Kallman H. (Ed.), Space Research, Proc. Ist International Space Sciences Symposium, Nice, France, North-Holland, Amsterdam, 1960.
8. Kuiper G. P. (Ed.), Atmospheres of the Earth and Planets, University of Chicago Press, Chicago, 1952. (Русский перевод 1-го изд.: Атмосферы Земли и планет, М., 1949.)
9. Watson F. G., Between the Planets, Harvard University Press, Cambridge, 1956. (Русский перевод 1-го изд.: Ватсон Ф., Между планетами, М., Гостехиздат, 1948.)

Су-Шу Хуанг

6 ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Мы рассмотрим необходимые условия существования жизни, в особенности ее высокоразвитых форм, в свете современных знаний о звездах и их эволюции.

Человек преодолел силу земного притяжения. В течение ближайших нескольких лет он определенно узнает, существует или нет жизнь на других планетах солнечной системы. Однако расстояния между звездами громадны, и еще очень далеко то время, когда можно будет эмпирическим путем установить существование жизни за пределами солнечной системы. Но это не является препятствием для «теоретического» рассмотрения проблемы на основе современных астрофизических, биологических и химических знаний.

Для изучения проблемы существования жизни во Вселенной мы должны рассмотреть два независимых вопроса: 1) вероятность образования планет вблизи звезд и 2) вероятность возникновения жизни на этих планетах. Первый вопрос связан с тем, как образуются звезды, и здесь не будет рассматриваться. Достаточно сказать, что, согласно современным представлениям, образование планет около звезд отнюдь не является редким событием [1]. Вторая проблема представляет «астробиологический» интерес и является основным предметом этой заметки.

Если допустить, что вероятность образования планет вблизи всех звезд одинакова, то возникает вопрос: в состоянии ли мы определить, вблизи каких звезд жизнь на их

планетах возникает с большей вероятностью? Мы считаем, что на этот вопрос можно дать правильный ответ уже на основе современных знаний.

Хорошо известно, что большинство атомов неспособно к коагуляции в большие молекулы, являющиеся элементарными «кирпичиками» живой материи, а атомы углерода как раз обладают именно этим свойством. Так существование жизни в других мирах должно зависеть от этого замечательного свойства атомов углерода. Другими словами, законы химии органических соединений должны быть универсальными, хотя реальные морфологические формы жизни могут быть в разных местах различными. Поэтому наличие жизни можно ожидать лишь на тех планетах, где температура лежит в определенных пределах. Именно из этого тезиса следуют излагаемые ниже выводы.

ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ И ЗВЕЗДНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Прежде всего определим t_b как время биологической эволюции, в результате которой хаотическая совокупность «неодушевленных» атомов превращается в форму разумной жизни. В случае биологической эволюции на Земле t_b порядка нескольких миллиардов лет. Затем рассмотрим эволюцию звезд — больших газовых масс, частицы которых удерживаются вместе силами взаимного притяжения. Светимость звезды (т. е. количество энергии, излучаемой в единицу времени) обеспечивается либо термоядерными реакциями между составляющими ее частицами, либо гравитационным сжатием. В самом начале эволюции, когда звезда еще недостаточно горяча для начала термоядерных реакций, энергия излучается за счет гравитационного сжатия. Это первая фаза звездной эволюции. Когда в результате гравитационного сжатия температура достаточно возрастет, в ядре звезды начинаются термоядерные реакции, которые превращают водород в гелий. Начиная с этого момента излучаемая энергия в точности компенсируется освобождаемой в ходе этих реакций. Поэтому в течение длительного времени, пока не выгорел водород в ядре, звезда сохраняет постоянными

свои светимость и радиус. Такие звезды называют «звездами главной последовательности». Светимость и эффективная температура звезды главной последовательности зависят от ее массы. На стадии главной последовательности звезда находится гораздо дольше, чем на ранней стадии сжатия. После выгорания водорода в ядре звезда сходит с главной последовательности и вновь быстро эволюционирует с изменением светимости, что составляет третью ступень эволюции. Чтобы могла возникнуть жизнь на одной из ее планет, звезда должна находиться на главной последовательности, в противном случае быстрая ее эволюция разрушит жизнь. Таким образом, если время звездной эволюции t_s определить как время пребывания звезды на главной последовательности, то первое условие существования высокоразвитых форм жизни на некоторой планете есть

$$t_s \geqslant t_b.$$

Иначе жизнь погибнет (вследствие эволюции звезды) прежде, чем достигнет максимального уровня развития. Далее, t_s можно вычислить для звезд главной последовательности, обладающих различными массами. Оно меняется от 10^7 лет для ранних звезд класса O до более чем 10^{11} лет для M-звезд [1].

Оценим теперь величину t_b. Возраст Земли около $4{,}5\cdot10^9$ лет, в то время как палеонтологические исследования говорят о существовании жизни на Земле в течение $1{,}0\cdot10^9$ лет. В качестве предварительного значения примем $t_b = 3{,}0\cdot10^9$ лет. Если это так, то для звезд ранних спектральных классов (O, B, A) $t_s < t_b$. Следовательно, на связанных с этими звездами планетах нельзя ожидать существования высших форм жизни.

Можно усомниться в корректности использования значения $3\cdot10^9$ лет для t_b вообще, поскольку это значение основано лишь на одном примере — эволюции жизни на Земле. Однако можно доказать, что это значение t_b нельзя сильно уменьшать, так как, согласно современным биологическим представлениям, естественный отбор и эволюция организмов являются результатом мутаций, которые по природе своей случайны и потому происходят медленно. Здесь позволительно спросить:

не может ли повышенное ультрафиолетовое излучение и, возможно, потоки высокоэнергичных частиц от звезд ранних спектральных классов увеличить скорость мутаций по сравнению с земной и тем самым ускорить эволюцию организмов? Чтобы ответить на этот вопрос, следует отметить, что большинство мутаций являются вредными. Отсюда следует, что мутации должны быть редкими, для того чтобы действовать в пользу естественного отбора. Если бы мутации были слишком частыми, то была бы значительна вероятность различных мутаций в одном и том же индивидууме. Вообще говоря, вредные мутации должны преобладать над полезными, так как первые происходят более часто. Следовательно, повышенная скорость мутационного процесса приведет не к развитию, а к гибели вида [2]. Поэтому значение t_b нельзя сильно уменьшить. Таким образом, звезды классов O, B, A и, может быть, ранние F приходится исключить из числа звезд, допускающих появление и развитие жизни на своих планетах. Для O- и B-звезд t_s порядка 10^7—10^8 лет; поэтому не ясно, может ли жизнь даже в самых примитивных формах существовать на планетах этих звезд.

ЗОНА «ОБИТАЕМОСТИ» В ОКРЕСТНОСТИ ЗВЕЗДЫ

Пусть светимость звезды равна L. Эта энергия доставляет необходимое для живых организмов тепло. Количество тепла, получаемое живыми существами планеты, не должно быть ни слишком большим, ни слишком малым — в противном случае они погибнут. Вследствие этого определим зону обитаемости вокруг каждой звезды так, чтобы поток энергии $L/4\pi R^2$, где R — расстояние от звезды, был заключен между верхним пределом

$$\varepsilon_1 = \frac{L}{4\pi R_1^2}$$

и нижним

$$\varepsilon_2 = \frac{L}{4\pi R_2^2},$$

где ε_1 и ε_2 — постоянные, не зависящие от самой звезды, а R_1 и R_2 определяются этими выражениями. Планета

может быть обитаемой, если ее расстояние от звезды удовлетворяет условию

$$R_1 < R < R_2.$$

Если все планеты в системе звезды образовались приблизительно в одной плоскости (подобно солнечной системе), то зона обитаемости представляет собой круговое кольцо с площадью

$$A = \pi (R_2^2 - R_1^2) = \frac{L}{4}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{\varepsilon_1}\right),$$

пропорциональной светимости L звезды. Если же условия были благоприятными для образования планет во всем сферическом объеме вокруг звезды, то зона обитаемости представляет собой сферический слой с объемом

$$V = \frac{4}{3}\pi (R_2^3 - R_1^3) = \frac{L^{3/2}}{6\pi^{1/2}}\left(\frac{1}{\varepsilon_2^{3/2}} - \frac{1}{\varepsilon_1^{3/2}}\right),$$

пропорциональным $L^{3/2}$. В любом случае размеры зоны обитаемости увеличиваются с возрастанием светимости звезды. Чем выше светимость звезды, тем больше вероятность того, что планета попадет в зону обитаемости и станет носителем жизни. По этой причине для звезд нижней части главной последовательности (подобных поздним карликам классов K и M) вероятность того, что их планеты попадут в «зону жизни», мала. Например, светимость звезд главной последовательности спектрального класса K5 составляет $^1/_{10}$ светимости Солнца. Следовательно, их «зона жизни» в 10 раз меньше солнечной, если все планеты располагаются в одной плоскости, и в $10^{3/2}$ раз меньше, если планеты не сосредоточены в одной плоскости. Поскольку при переходе к звездам спектральных классов более поздних, чем K5, светимость их быстро падает, то зоны обитаемости поздних K- и M-звезд становятся очень малыми.

Вероятность обнаружить жизнь на планетах звезд низкой светимости будет еще меньше, если учесть тот факт, что орбиты планет обычно являются не круговыми, а эллиптическими. Действительно, если в пределах зоны обитаемости окажется лишь малая часть ее некруговой орбиты, то планета не может стать обитаемой.

Конечно, нельзя исключить возможность обнаружения жизни на планетах, вращающихся вокруг слабых (по светимости) звезд главной последовательности, но вероятность этого ничтожно мала. Поскольку число таких карликовых звезд в нашей и в других галактиках велико, то некоторые из них могут иметь планеты, населенные живыми существами. Если таковые существуют, то они имеют много времени для биологической эволюции, так как звезды низкой светимости чрезвычайно долго находятся на главной последовательности. Следовательно, живые организмы, их населяющие, могут эволюционировать к очень высоким формам.

Из изложенных здесь и в предыдущем разделе соображений следует, что поиски высокоразвитых форм жизни следует ограничить звездами главной последовательности спектральных классов F (преимущественно поздних F), G и K (преимущественно ранних K). И если бы они обладали планетами, то вероятность существования на них цветущей жизни была бы довольно велика. Интересно отметить, что наше Солнце, являющееся звездой G2 главной последовательности, вполне может поддерживать жизнь по крайней мере на одной из своих планет в полном согласии с полученным выводом.

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Поскольку около половины звезд в окрестностях Солнца являются двойными или системами более высокой кратности, то интересно решить вопрос, способствуют ли такие комбинации возникновению жизни на планетах системы. Ответ ясен. Они оказывают тормозящее влияние на развитие жизни по двум причинам — динамической и физической.

С точки зрения динамики планета, вращающаяся около одной компоненты двойной или кратной системы, непрерывно испытывает возмущения со стороны других компонент. Вероятность того, что планета сохранит свое положение в пределах зоны обитаемости своей центральной звезды в течение масштабов времени больше t_b, и тем самым вероятность поддержания жизни значительно уменьшится. Для не слишком тесных двойных (визуально

двойных) возможны квазиустойчивые планетные орбиты в непосредственной близости каждой компоненты. Это видно, например, из того факта, что околоземная орбита Луны достаточно устойчива, несмотря на возмущения со стороны Солнца. Однако масштаб времени, в течение которого планета остается в пределах зоны обитаемости, связан с задачей трех тел, и его трудно оценить. В случае тесных двойных (затменно- и спектрально-двойных), когда зона обитаемости окружает обе компоненты, наиболее вероятно, что в пределах зоны обитаемости вообще не существует динамически устойчивых орбит, если только масса одной компоненты не превосходит значительно массу другого или если расстояние между компонентами не слишком мало.

С физической точки зрения если одна из компонент относится к раннему спектральному классу (O, B, A), то не может быть речи о жизни в силу вышеуказанных причин независимо от того, какова другая компонента системы. Для двойных с большим расстоянием между компонентами это ограничение теряет силу, и можно рассматривать обе компоненты отдельно. Однако присутствие белого карлика как одной из компонент значительно снижает вероятность жизни даже в таких двойных системах. Если, как предполагают в настоящее время астрономы, звезда, прежде чем стать белым карликом, испытывает катастрофическое изменение светимости (подобное взрыву новой и т. п.), то последнее будет, вероятно, сопровождаться потоками частиц высоких энергий, что приведет к гибели живых существ в ближайшей окрестности. Затем должно пройти еще время t_b, прежде чем на планетах системы, в которой произошла катастрофа, вновь сможет возникнуть жизнь.

Наконец, можно поставить вопрос: связано ли формирование благоприятных для жизни условий на планетах звезды с орбитой ее движения вокруг центра Галактики? Солнце со своими окрестностями движется по круговой орбите вокруг центра Галактики, так что изменения, происходящие за каждый оборот (около $2 \cdot 10^8$ лет) в его окрестностях, ничтожны.

Оказывают ли изменения в окрестностях звезды какое-либо вредное влияние на жизнь, если звезда (подоб-

но звездам с высокой скоростью движения) движется в Галактике по эксцентрической орбите? Ответ на этот вопрос остался бы сейчас чисто умозрительным и потому выходит за пределы данной заметки.

ПРОВЕРКА БЛИЖАЙШИХ ЗВЕЗД

Сделанные выше выводы справедливы везде, где применимы химические законы, или, строго говоря, законы квантовой механики. Что последние применимы в видимой части Вселенной, можно видеть по спектральным линиям, излучаемым далекими галактиками, так как спектральные линии предсказываются квантовой маханикой. Фактически и излучение атомами спектральных линий, и образование молекул представляют собой квантомеханические явления с участием тех же валентных электронов. Следовательно, предыдущее рассмотрение может дать нам верхний предел процента звезд, с которыми могут быть связаны живые существа. Так как большинство звезд — это карлики класса M, многие из которых — тесные двойные и большое число которых вообще не являются звездами главной последовательности, мы примем, что верхний предел для окрестностей Солнца составляет 5%. Точное процентное содержание звезд, вблизи которых действительно возникла и развивается жизнь, зависит от способа образования звезды и планеты и не может быть строго оценено объективно.

Проверим «способность к поддержанию жизни» ближайших звезд. В сфере радиусом 5 *парсек* (около 16,7 св. лет) с центром в Солнце содержатся 42 звезды (включая Солнце) [3], из которых большинство — слабые M-карлики и поздние K-звезды. Многие являются двойными и кратными системами, некоторые из них содержат в своем составе белые карлики. Далее, если исключить из рассмотрения звезды с высокими скоростями, временно пребывающими в окрестностях Солнца, то остаются лишь три звезды (табл. 1), на планетах которых может быть обнаружена жизнь. Из этих трех звезд Солнце обладает максимальной светимостью и потому наиболее пригодно для поддержания жизни на своих планетах. Если ε Эридана и τ Кита — действительно

Таблица 1

Ближайшие звезды, для которых вероятность существования жизни на их планетах (если они есть) **выше средней**

Звезда	Расстояние, в световых годах	Спектральный класс	Светимость
Солнце	—	G2	1,00
ε Эридана	10,8	K2	0,34
τ Кита	11,8	G4	0,38

одиночные звезды, то существует некоторая вероятность обнаружить вблизи них населенные планеты. Что τ Кита — одна из близких к Солнцу звезд — из-за своего подобия Солнцу может обладать планетами, населенными живыми существами, на это указывал несколько раз Струве.

В заключение мы коснемся проблемы жизни на планетах (если таковые существуют) ближайшей к Солнцу звезды α Центавра. Это тройная система, две более массивные компоненты которой (G4, K1) вращаются одна вокруг другой по орбите с большой полуосью около 20 а. е. Эксцентриситет орбиты довольно велик. Таким образом, трудно себе представить, чтобы планеты оставались в зоне обитаемости в течение длительного промежутка времени. Следовательно, не приходится ожидать существования высокоразвитых форм жизни на планетах нашего ближайшего соседа в космическом пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Struve O., Stellar Evolution, Princeton, N. J., 1950. (Русский перевод: Струве О., Эволюция звезд, М., 1955.)
2. Schrödinger E., What Is Life?, N. Y., 1941. (Русский перевод: Шредингер Э., Что такое жизнь с точки зрения физики?, М., 1947.)
3. van de Kamp P., Sky and Telescope, 14, 498 (1955).

Су-Шу Хуанг

7 ПРОБЛЕМА ЖИЗНИ ВО ВСЕЛЕННОЙ И ОБРАЗОВАНИЕ ЗВЕЗД

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

В предыдущей главе мы рассмотрели проблему жизни во Вселенной, в особенности ее высокоразвитых форм, и сделали некоторые общие заключения о ее происхождении [1].

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЛАНЕТ, ПРИНАДЛЕЖАЩИХ ДРУГИМ ЗВЕЗДНЫМ СИСТЕМАМ

Во всех предыдущих рассуждениях предполагалось, что вероятность возникновения планет вблизи различных звезд одинакова. Действительное число обитаемых миров во Вселенной сильно зависит от механизма образования звезд. Если образование планет вблизи звезд является редким событием по сравнению с образованием самих звезд, то и жизнь будет соответственно редким явлением. Если планеты образуются преимущественно в системе очень массивных звезд, звезд очень малой массы или в двойных или кратных системах, то вероятность существования жизни на этих планетах будет очень малой. Только если образование планет является общим феноменом, связанным также и с одиночными звездами F, G и K, то вероятность существования жизни в других системах будет достаточно велика. Поэтому проблема существования жизни во Вселенной сводится на первом этапе к вопросу: существуют ли одиночные звезды главной последовательности F, G и K, обладающие планетами?

Поиски планет — членов других звездных систем — обсуждались Струве [2] и являются в настоящее время малообещающими. В качестве иллюстрации (которую часто использовал Струве) гипотетической системы можно рассмотреть Солнце и Юпитер. Если мы находимся на расстоянии в 10 *парсек* от такой системы и луч зрения лежит в плоскости орбиты планеты, то какой точностью должны обладать наши измерения, чтобы можно было обнаружить наличие Юпитера по наблюдениям Солнца?

Таблица 1

Точность измерений при обнаружении планеты типа Юпитера в гипотетической системе Солнце—Юпитер на расстоянии 10 *парсек*

Способы обнаружения	Требования
Астрометрический	Измерять угловое отклонение $0'',0005$
Спектроскопический	Измерять радиальную скорость с точностью 0,01 *км/сек*
Фотометрический	Измерять изменения светимости на $0^m,01$

Табл. 1 содержит величины, характеризующие точность для различных способов наблюдений. Современная точность астрометрического и спектроскопического методов намного хуже требуемой. Точность, требуемая от фотометрического метода, находится в пределах возможностей современной техники. С другой стороны, затмение продолжается лишь в течение суток в каждые 12 лет, да и то лишь при наблюдении в плоскости орбиты. Если луч зрения образует с орбитальной плоскостью угол в несколько угловых секунд, то затмение уже не может наблюдаться. Поэтому систематические поиски планет фотометрическими методами практически невозможны. Однако планеты размером с Юпитер могли бы быть *случайно* обнаружены при фотометрических измерениях. Конечно, значительно проще обнаружить планету размером с Юпитер спектроскопическим методом при попадании ее внутрь орбиты Меркурия.

ПРОБЛЕМА СУЩЕСТВОВАНИЯ ПЛАНЕТ

Если нельзя с полной уверенностью обнаружить планеты за пределами солнечной системы, возможно ли найти косвенные признаки их существования? Ответ на этот вопрос — положительный. Имеются три независимых аргумента в пользу того, что образование планет вокруг звезд является обычным явлением.

Во-первых, мы знаем, что нет резкого различия между двойными или кратными звездами и планетными системами. Согласно Койперу, среднее значение расстояния между компонентами по всем исследованным двойным составляет около 20 а. е., т. е. того же порядка, что и расстояния больших планет от Солнца [3]. Из астрометрических наблюдений малых возмущений двойной 61 Лебедя Стрэнд нашел для массы слабого невидимого компонента значение 0,01 $M_{\odot}$ [4]. Это значение лежит между звездными массами и массой Юпитера. Разумно считать поэтому, что существует непрерывный переход от масс более слабых компонент двойных звезд к массам планет. Поскольку двойные звезды составляют более половины звездного населения Галактики, естественно ожидать, что планетные системы не являются исключительно редкими.

Во-вторых, мы располагаем результатами Юри, полученными при изучении структуры и состава метеоритов [5]. Согласно Юри, некоторые типы метеоритов, по-видимому, прошли в прошлом стадию высокого давления, которое может существовать лишь в телах размером с Луну. Более того, на основе этого результата Юри построил модель происхождения солнечной системы. Мы назвали эти лунноподобные объекты «дозвездными ядрами» и рассматривали их как важную стадию в образовании и звезд, и планет [6]. В этом случае процесс образования планет должен сопровождать выход звезды из той среды, которая содержит в себе значительное число дозвездных ядер.

Наконец, рассмотрим вопрос о моменте вращения звезд. Впервые было отмечено Струве, что быстрое осевое вращение звезд главной последовательности довольно резко «обрывается» вблизи спектрального класса F5 [7]. Другими словами, средний момент вращения приходящийся на единицу массы звезд главной последовательности, претерпевает разрыв в этой точке. Возникает естественный вопрос: что происходит с первоначальным моментом вращения одиночных звезд главной последовательности со спектральным классом, более поздним, чем F5? Разумный ответ (или предположение) состоит в том, что этот недостаток момента вращения объясняется орбитальным движением невидимых планет, вращающихся вокруг звезд [6]. Другими словами, планетные системы появляются, когда осевое вращение замедляется. Согласно такому представлению, планеты образуются вблизи звезд главной последовательности, более поздних, чем F5. Таким образом, планеты должны возникать как раз там, где условия наиболее пригодны для возникновения жизни. Основываясь на этом, можно предсказать, что почти для всех одиночных звезд главной последовательности между F5 и K5 вероятность возникновения жизни на их планетах довольно высока. Поскольку они составляют несколько процентов от общего числа звезд, жизнь, действительно, должна быть распространенным явлением во Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang S.-S., Am. Scientist, **47**, 397 (1959).
2. Struve O., Observatory, **72**, 199 (1952).
3. Kuiper G. P., Publ. Astron. Soc. Pacific, **47**, 15, 121 (1935).
4. Strand K. A., Astron. J., **61**, 319 (1956).
5. Urey H. C., Astrophys. J., **124**, 623 (1956).
6. Huang S.-S., Publ. Astron. Soc. Pacific, **69**, 427 (1957).
7. Struve O., Astrophys. J., **72**, 1, 1930; Stellar Evolution Princeton, N. Y., 1950, Ch. 2. (Русский перевод: Струве О., Эволюция звезд, М., 1955.)

8 ЗОНЫ ОБИТАЕМОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

В двух предыдущих главах мы рассмотрели требования, которым должна удовлетворять звезда для того, чтобы стало возможным возникновение высших форм жизни в ее окрестности [1]. Был сделан вывод, что в двойных системах меньше вероятность найти пригодную для жизни планету, чем вблизи одиночной звезды. Далее было высказано (без количественных доказательств) утверждение, что если планета с пригодными для жизни условиями вообще существует в такой системе, то это должна быть внутренняя планета в случае двойной системы с большим расстоянием между компонентами, и внешняя — в случае тесной двойной звезды. В данной статье приводится количественное обоснование этого утверждения.

ЗОНА ОБИТАЕМОСТИ В СИСТЕМЕ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ

Рассмотрим точку на расстояниях r_1 и r_2 соответственно от главной компоненты и спутника двойной системы. Полное количество энергии, принимаемое на единицу площади в этой точке от двух звезд, зависит от ориентации принимающей поверхности. Если пренебречь эффектом ориентации, то получаемое единичной площадкой за 1 *сек* количество энергии

$$\varepsilon = \frac{l_1}{4\pi r_1^2} + \frac{l_2}{4\pi r_2^2}, \qquad (1)$$

где l_1 и l_2 — светимости соответственно главной звезды и спутника. Если выразить ε через энергию, получаемую в единицу времени единичной площадкой поверхности, обращенной к Солнцу и расположенной на среднем расстоянии Земли от Солнца, то (1) можно переписать как

$$\varepsilon = \frac{l_1}{r_1^2} + \frac{l_2}{r_2^2},$$

или

$$\frac{1}{\left(\frac{r_1}{a}\right)^2} + \frac{l_2}{l_1} \frac{1}{\left(\frac{r_2}{a}\right)^2} = C, \qquad (2)$$

где

$$C = \frac{a^2 \varepsilon}{l_1}. \qquad (3)$$

Здесь единицей измерения светимости служит светимость Солнца, а расстояния выражаются в астрономических единицах. Величина ε является фактором, определяющим возможность биологической эволюции. Жизнь не может развиваться там, где ε на несколько порядков величины отличается от единицы (в выбранной системе единиц). Более определенную оценку интервала, допускающего существование жизни, можно получить, рассматривая значения ε в солнечной системе; из табл. 1 легко оценить, что верхний предел ε_1 находится около 5,0, а нижний ε_2 — около 0,1. Следовательно, чтобы жизнь

Таблица 1

Значение ε для различных планет

Планета	ε
Меркурий	6,68
Венера	1,913
Земля	1,000
Марс	0,433
Юпитер	0,037
Сатурн	0,011

была возможной, необходимо

$$\varepsilon_1 > \varepsilon > \varepsilon_2. \qquad (4)$$

Имея предельные значения ε, можно определить зону обитаемости (с точки зрения тепловых условий) из (2), которое для каждого значения l_2/l_1 определяет серию поверхностей с постоянным C (изоповерхности C). Эти

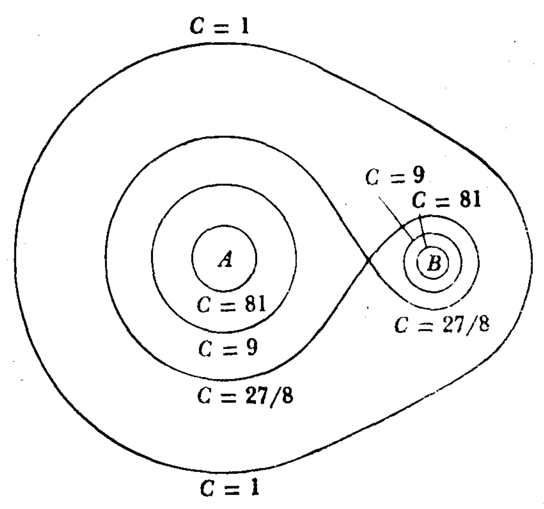


Рис. 1. Поверхности равных C для $l_2/l_1 = 0{,}125$. Единичная площадка в любой точке каждой из этих поверхностей получает в единицу времени приблизительно одинаковое полное количество энергии от двух звезд A и B.

поверхности обладают цилиндрической симметрией. Поэтому любое сечение в плоскости, пересекающей ось, позволяет выявить форму поверхности. Рис. 1 иллюстрирует сечения нескольких из таких поверхностей для $l_2/l_1 = 0{,}125$. Когда даны расстояния a и светимости l, зона обитаемости (по тепловым условиям) системы представляет собой пространство, ограниченное двумя поверхностями, определяемыми так:

$$C = C_1 = \frac{a^2\varepsilon_1}{l_1} \quad \text{и} \quad C = C_2 = \frac{a^2\varepsilon_2}{l_1}.$$

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ОРБИТЫ ТРЕТЬЕГО ТЕЛА В ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ

Проблемой определения периодических орбит малого тела, движущегося в гравитационном поле двух больших тел, и изучением их устойчивости занимались несколько выдающихся математиков. Наиболее важный результат

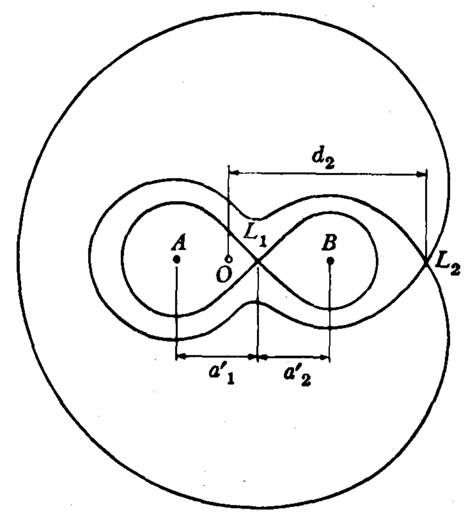


Рис. 2. Критические поверхности в ограниченной задаче трех тел. A и B — две большие массы, а O — центр их масс. Внутренняя поверхность, которая проходит через точку L_1, ограничивает периодические орбиты внутренних планет, в то время как внешние периодические орбиты, представляющие интерес, должны лежать за пределами самой внешней поверхности, проходящей через точку L_2. Точки A, O, L_1, B и L_2 лежат на одной прямой.

получен в приближении, называемом «ограниченной задачей трех тел» и рассматривающем случай, когда две большие массы вращаются вокруг центра масс по круговым орбитам [2]. В рамках ограниченной задачи трех тел мы можем найти для каждой двойной системы две

критические поверхности — внутреннюю контактную и внешнюю контактную [3]. Для простоты мы будем рассматривать только пересечение этих двух критических поверхностей с экваториальной плоскостью двух больших масс (рис. 2) и изучать орбиты третьего тела с бесконечно малой массой только в этой плоскости. Можно ожидать существования устойчивых орбит третьего тела либо внутри внутренней контактной поверхности (для внутренних планет), либо за пределами внешней контактной поверхности (для внешних планет). Это не означает, что нет других устойчивых периодических орбит. Действительно, уже найдено несколько орбит, которые не попадают ни в одну из названных категорий. Например, существуют знаменитые треугольные решения Лагранжа. Однако они требуют некоторых специальных начальных условий или некоторых ограниченных значений для отношения масс двух больших тел. Следовательно, этот класс решений, видимо, не представляет интереса для стоящей перед нами проблемы. Действительно, когда двойная система образовалась из турбулентной массы пыли и газа, легко представить себе образование планет, движущихся по приблизительно круговым орбитам, либо вокруг каждой из компонент, либо вокруг обеих компонент на больших расстояниях. В том, что планеты могут образоваться вокруг каждой компоненты несмотря на возмущения от другой компоненты, можно убедиться на примере того, что наблюдаемые часто газовые кольца вращаются вокруг более массивного члена даже в тесных двойных [4].

Мы знаем, что наличие устойчивых орбит внутри внутренней контактной поверхности прямо следует из существования спутников в солнечной системе. Очевидно также, что чем ближе к любому из компонент находится внутренняя планета, тем более устойчива ее орбита. Однако трудно вычислить критический размер наибольших орбит во внутренней контактной поверхности для времени свыше примерно $3 \cdot 10^9$ лет. Впрочем можно исследовать эту проблему полуэмпирическим способом. Рассмотрим движение спутника в какой-либо системе Солнце — планета как ограниченную проблему трех тел. Соответствующие внутренняя и внешняя контактные поверхности могут быть вычислены из отношения масс Солнца и планеты [2, 3]. В табл. 2

Таблица 2

Радиус орбиты внешнего спутника и размер внутренней контактной поверхности, выраженные в расстояниях «родительской» планеты от Солнца

Система спутников	R	a_2'
Земля	$2{,}565 \cdot 10^{-3}$	$9{,}97 \cdot 10^{-3}$
Марс	$1{,}031 \cdot 10^{-4}$	$4{,}75 \cdot 10^{-3}$
Юпитер	$3{,}043 \cdot 10^{-2}$	$6{,}67 \cdot 10^{-2}$
Сатурн	$9{,}07 \cdot 10^{-3}$	$4{,}50 \cdot 10^{-2}$
Уран	$2{,}04 \cdot 10^{-4}$	$2{,}42 \cdot 10^{-2}$
Нептун	$7{,}86 \cdot 10^{-5}$	$2{,}56 \cdot 10^{-2}$

приводятся радиусы орбит спутников, наиболее удаленных от каждой из планет, и расстояние a_2' между точкой Лагранжа L_1 (рис. 2) и планетой, причем единицей расстояния в каждом случае является расстояние от Солнца до соответствующей планеты. Так как a_2' характеризует размер вторичной петли внутренней контактной поверхности, мы сразу можем видеть, насколько далеко от планеты может быть спутник во внутренней контактной поверхности, оставаясь все же на устойчивой орбите. Из табл. 2 следует, что $a_2'/2$ есть предел, так как не обнаружено спутников, большие полуоси орбит которых были бы больше этого значения. Поэтому, возвращаясь к проблеме планет в двойных системах, можно ожидать, что радиусы устойчивых орбит внутренних планет главной звезды и спутника меньше $a_1'/2$ и $a_2'/2$ соответственно.

Если расстояние точки L_2 от центра масс системы есть d_2 (рис. 2), внешняя планета должна иметь орбиту с радиусом больше d_2, чтобы находиться за пределами внешней контактной поверхности. Здесь интересно отметить, что d_2 изменяется очень медленно — и, более того, не монотонно — в зависимости от отношения масс, превышая на множитель 1,0 — 1,27 расстояние между компонентами [3]. Поэтому значение d_2 может оказаться не столь удобным критерием размера устойчивых внешних орбит, как a_1' и a_2' для внутренних орбит, поскольку следовало

ожидать монотонной зависимости размера самой малой устойчивой внешней орбиты от отношения масс. Если рассматривать Сатурн как третье тело в системе Солнце — Юпитер, то орбита Сатурна, находящегося на расстоянии 1,8 d_2 от Солнца, уже устойчива. Однако при большей массе спутника нельзя было бы ожидать наличия устойчивых орбит на таком расстоянии. Действительно, почти все из известных тройных систем состоят из одной тесной пары и третьей более далекой компоненты. Более того, случай внешних орбит также применим к очень тесным двойным, в которых каждая компонента подвержена сильному разрушающему воздействию притяжения второй компоненты. В этих условиях возмущения, испытываемые третьим телом, значительно более сложны, чем обусловленные двумя точечными массами. Следовательно, мы примем 10 d_2 в качестве минимального размера внешней орбиты для третьего тела в двойной системе. Эта проблема нуждается, конечно, в дальнейшем исследовании.

ЗОНА ОБИТАЕМОСТИ В ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ И РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ

Рассмотрим вначале внутреннюю планету. Согласно изложенному выше, орбита обитаемой планеты должна отстоять не далее чем на $a_1'/2$ и на $a_2'/2$ от главной и второй компонент соответственно. С другой стороны, она не может быть слишком близкой к звезде — в противном случае температура оказалась бы слишком высокой. Эти два условия устанавливают нижний предел расстояния между компонентами в двойных системах, которые могут поддерживать жизнь на своих внутренних планетах. С помощью (3) и (4) это условие можно записать как

$$a > \left(\frac{C_i l_1}{\varepsilon_1}\right)^{1/2} \text{ а. е.,} \tag{5}$$

где C_i — максимальное значение C для наибольшей орбиты в пределах внутренней контактной поверхности. Физический смысл этого неравенства заключается в том, что оно требует, чтобы в двойной системе перекрывались зоны с подходящим тепловым режимом с зоной динамических устойчивых орбит. Фактически a должно значительно превысить это значение еще до того, как область перекрытия зон достигнет значительного размера. Лишь когда a достигает значения

$$\left(\frac{C_i l_1}{\varepsilon_2}\right)^{1/2} \text{ а. е.,} \tag{6}$$

компонента двойной системы имеет зону обитаемости таких же размеров, как одиночная звезда.

Приняв соотношение масса — светимость вида $l \sim m^4$, мы вычислим значения C_i для трех отношений масс в предположении, что точки наибольшей устойчивой орбиты для внутренней планеты отстоят от ее центральной звезды не далее чем на $a_j'/2$ ($j = 1, 2$ для двух компонент). Результаты даны в табл. 3, где значения C_i приводятся для орбит вокруг главной звезды (P) и ее спутника (S).

Таблица 3

Значения C_i и C_e

m_1/m_2	C_i	C_e
1	P: 17,78 S: 17,78	0,01669
1,25	P: 15,34 S: 8,54	0,00933
2,5	P: 11,42 S: 2,19	0,00783

Рассмотрим теперь внешние планеты. По динамическим соображениям их расстояние от центра масс должно превосходить некоторое определенное расстояние. Но с точки зрения обеспечения теплового режима они не могут находится слишком далеко. Из (3) и (4) мы получаем следующее условие:

$$a < \left(\frac{C_e l_1}{\varepsilon_2}\right)^{1/2} \text{ а. е.,} \tag{7}$$

где C_e — минимальное значение C, соответствующее наименьшей устойчивой орбите внешней планеты. Когда a уменьшается, область перекрытия «термически обитаемой зоны» и зоны динамической устойчивости увеличивается до тех пор, пока a не достигнет предела

$$\left(\frac{C_e l_1}{\varepsilon_1}\right)^{1/2} \text{ а. е.,} \qquad (8)$$

после которого область перекрытия зон сохраняет свою максимальную величину. Предположив, что точки самой малой орбиты в любой момент времени удалены от центра масс по меньшей мере на 10 d_2, мы вычислим значения C_e для трех отношений масс (табл. 3).

Чтобы привести численный пример, найдем из (5) и табл. 3, что для $m_1 = m_2$ зона обитаемости начинается внутри внутренней контактной поверхности, когда $a = 2l_1^{1/2}$ а. е. Она увеличивается в размерах, пока a не достигнет $13l_1^{1/2}$ а. е., после чего, согласно (6), двойственность звезд не влияет на размеры зоны обитаемости вокруг них. Это условие не является строгим: многие визуальные и некоторые спектроскопические двойные дают те же возможности для возникновения жизни, что и одиночные звезды. Однако следует подчеркнуть, что это справедливо лишь для двойных с большим расстоянием компонент, имеющих почти круговые орбиты. Ситуация менее благоприятна, если двойная имеет орбиту с большим эксцентриситетом.

В случае тесных двойных применим критерий (7). При $m_1 = m_2$ обитаемые планеты могли бы существовать, когда a меньше $0{,}4l_1^{1/2}$ а. е. Область перекрытия достигает максимальных размеров, когда $a < 0{,}06l_1^{1/2}$ а. е. Вследствие этого очень тесные двойные, подобные W Большой Медведицы, могли бы иметь обитаемые планеты, вращающиеся вокруг системы в целом. Однако для любой двойной системы с $m_1 = m_2$ и с расстоянием компонент между $0{,}4l_1^{1/2}$ и $2l_1^{1/2}$ а. е. вероятность существования в ней обитаемых планет очень мала. Эта вероятность ниже, чем для одиночных звезд, также и в том случае, когда расстояние между компонентами заключено в интервале от $0{,}06l_1^{1/2}$ до $13l_1^{1/2}$ а. е. Для других отношений масс запретные

интервалы уже выражаются иначе, но могут быть вычислены аналогичным образом.

Вероятное число обитаемых планет в двойных системах очень сильно зависит от механизма образования двойных систем. Являются ли образование двойных систем и образование планетных систем взаимно исключающими процессами или они могут происходить одновременно? К сожалению, мы не можем в настоящее время дать ответа на этот вопрос.

Наконец, рассмотрим пример нашего ближайшего соседа — тройной системы α Центавра. Относительная орбита двух более массивных компонент имеет большую полуось 23,4 а. е. и эксцентриситет 0,52. Расстояние между компонентами достаточно велико, чтобы возможно было существование планет в пределах внутренней контактной поверхности. Однако эксцентриситет орбиты слишком велик, чтобы было обоснованным прямое применение вышеизложенного анализа. В недавнем исследовании [5] сделано предположение, что система может эволюционировать еще до вступления на главную последовательность. Если так, то система слишком молода, чтобы на ее планетах успели развиться высшие формы жизни, даже если система обладает планетами с пригодными для жизни условиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang S.-S., Am. Scientist, **47**, 397 (1959); Publ. Astron. Soc. Pacific, **71**, 421 (1959).
2. Moulton F. R., An Introduction to Celestial Mechanics, N. Y., 1914, Ch. 8 (русский перевод: Мультон Ф., Введение в небесную механику, ОНТИ, 1935); Message P. J., Astron. J., **64**, 226 (1959); Struve O., Huang S.-S., Occasional Notes Roy. Astron. Soc., **3**, 161 (1957).
3. Kuiper G. P., Astrophys J., **93**, 133 (1941); Kopal Z., Jodrell Bank Ann., **1**, 37 (1954); Kuiper G. P., Johnson J. R., Astrophys. J., **123**, 90 (1956).
4. Joy A. H., Publ. Astron. Soc. Pacific, **54**, 35 (1947); Struve O., Stellar Evolution, Princeton, N. Y., 1950. (Русский перевод: Струве О., Эволюция звезд, М., 1955.)
5. Huang S.-S., в печати.

Су-Шу Хуанг

9 РАЗМЕРЫ ОБИТАЕМЫХ ПЛАНЕТ

Чтобы получить критерии размеров обитаемых планет, необходимо прежде всего выяснить условия, при которых может возникнуть жизнь. Принято считать, что коацерваты в водном растворе представляют собой самую раннюю стадию развития органической субстанции в живые организмы [1]. Поэтому обитаемая планета должна обладать твердой корой и ее притяжение должно быть достаточным для того, чтобы удерживать воду. Действительно, существование живых организмов совершенно немыслимо без поддержания некоторых субстанций в виде жидкости.

Так как звезды и планеты образуются из межзвездной среды, то на ранних стадиях эволюции планета (или более вероятно протопланета) должна содержать большое количество водорода, особенно в своей внешней оболочке [2]. Вначале жизнь может возникнуть в менее пригодных для жизни условиях [1], но атмосфера, состоящая главным образом из водорода, не способствует развитию высших форм жизни. Таким образом, водородная атмосфера должна по крайней мере частично диссипировать [3]. Нынешняя атмосфера Земли является вторичной, образовавшейся в результате химических процессов, которые происходили после образования планеты [4]. Поэтому мы поставим такое условие, необходимое для того, чтобы планета была обитаемой: водородная атмосфера должна быть полностью или частично утрачена за время, короткое по сравнению с временем звездной эволюции.

Время эволюции звезд, способных поддерживать жизнь в своих окрестностях, составляет от 10^9 до 10^{11} лет [5]. В этом интервале значений можно определить верхний предел для полной массы обитаемой планеты, так как слишком массивная планета (например, Юпитер) будет удерживать свою водородную атмосферу очень долго [3]. С другой стороны, для того чтобы могла возникнуть жизнь в высших формах, вторичная атмосфера не должна быть потеряна, прежде чем разовьются живые организмы. Масштаб времени биологической эволюции на Земле составляет около $3 \cdot 10^9$ лет. Это условие дает нам нижний предел для массы обитаемой планеты.

Следует подчеркнуть, что при рассмотрении диссипации атмосферы мы отнюдь не имеем в виду настолько большую потерю массы планеты (или протопланеты), чтобы это существенно изменило ее относительный состав. И. С. Шкловский убедительно показал, что такое изменение невозможно [6]. С другой стороны, водород должен быть преобладающим ингредиентом в верхних слоях планеты на ее ранних стадиях вследствие его большого космического обилия и легкости.

Джинс определил скорость потери массы планетными атмосферами, вычислив число молекул, пересекающих на сфере площадку единичной площади в направлении наружу и имеющих скорость выше, чем скорость диссипации [7]. Он находит также время t_1 полной диссипации атмосферы. Так как Джинс считает, что скорость диссипации постоянна, время потери половины атмосферы равно просто $t_1/2$. С тех пор были выполнены некоторые более точные подсчеты скорости диссипации, но они не привели к каким-либо существенным отличиям от первоначальной формулы Джинса [7].

Если обозначить радиус и среднюю плотность планеты через a и ϱ и среднеквадратичную скорость молекул — через c, то

$$t_1 = \frac{4{,}35}{4\pi G\varrho} \frac{c^3}{a(c^2 + 4\pi G\varrho a^2)} \exp\left(\frac{4\pi G\varrho a^2}{c^2}\right). \qquad (1)$$

Чтобы сделать более наглядным физический смысл этой формулы, введем два параметра

$$\tau_0 = (4\pi G\varrho)^{-1/2} \quad \text{и} \quad \tau_1 = \frac{a}{c}. \qquad (2)$$

Если обозначить

$$x = \frac{\tau_1}{\tau_0}, \qquad (3)$$

то соотношение (1) принимает следующий безразмерный вид:

$$\frac{t_1}{\tau_0} = \frac{4,35}{x(1+x^2)} e^{x^2}. \qquad (4)$$

Мы вычислили x для значений $t_1 = 3\cdot10^9$ и $6\cdot10^9$ лет и для значений τ_0, соответствующих трем значениям ϱ. Результаты приведены в табл. 1. Существенно то, что

Таблица 1

Значения x

ρ, *г/см³*	τ_0, *сек*	x, $t_1 = 3\cdot10^9$ лет	x, $t_1 = 6\cdot10^9$ лет
3,5	$5,838\cdot10^2$	6,056	6,116
4,5	$5,149\cdot10^2$	6,067	6,126
5,5	$4,658\cdot10^2$	6,076	6,135

величина x, определяемая (4), не имеет сильной зависимости ни от t_1, ни от ϱ. Время, в течение которого звезда спектрального класса F, G или K остается на главной последовательности, меняется от 10^9 до 10^{11} лет. Чтобы могла возникнуть жизнь на планете, связанной с такими звездами, t_1 должно быть заключено в этом интервале. Соответствующие значения x меняются лишь от 5,8 до 6,4. Вследствие этого для всех практических задач x можно считать постоянным. Физически это означает, что возможность сохранения планетой атмосферы зависит не столько от ее возраста, сколько от ее радиуса и средней плотности.

Поэтому верхний предел радиуса обитаемой планеты запишется в виде

$$a = c\tau_0 x, \qquad (5)$$

где c — скорость молекулярного или атомарного водорода — также изменяется очень мало, так как она обратно пропорциональна корню квадратному из средней плотности, а средняя плотность разных твердых небесных тел отличается несущественно. Например, в случае планет солнечной системы средняя плотность заключена в пределах от 0,7 до 5,5. Есть основания полагать, что водород мог диссипировать на ранних стадиях эволюции планеты, когда средняя плотность была ниже ее конечного значения. Если так, то нельзя ожидать, что это вызовет изменение в порядке величины τ_0. Следовательно, верхний предел a определяется главным образом величиной c, т. е. тепловой скоростью во внешних слоях атмосферы (в «экзосфере», как их иногда называют), которую очень трудно оценить численно, особенно на ранних стадиях планетной эволюции. Однако можно указать разумный интервал температур, чтобы иметь возможность вычислить верхний предел для a. Результаты такого расчета содержит табл. 2, где использована скорость молекулярного водорода. Если преобладает атомарный водород, то пределы для a в табл. 2 следует увеличить в 1,4 раза.

Таблица 2

Наибольшие радиусы обитаемых планет

T, °K	c, *км/сек*	Радиусы, 10^3 *км*		
		$\varrho = 3,5$	$\varrho = 4,5$	$\varrho = 5,5$
173	1,47	5,2	4,6	4,2
273	1,84	6,5	5,8	5,2
373	2,15	7,6	6,7	6,1
573	2,66	9,4	8,3	7,5
1 000	3,51	12,4	11,0	9,9
2 000	4,96	17,5	15,5	14,0

Нижние пределы радиусов можно вычислить аналогичным образом. Если потребовать, чтобы кислород не терялся полностью за $3\cdot10^9$ или $6\cdot10^9$ лет, то нижний предел для a также определяется формулой (5), но теперь c означает скорость для молекул или атомов кислорода в зависимости от физических условий в экзосфере. Так как тепловая скорость молекул кислорода в 4 раза ниже,

чем молекул водорода, нижние пределы для a составляют одну четверть от полученных выше значений. Соотношение (5) можно переписать также в следующем виде:

$$a = \left(\frac{3kT}{4\pi G \varrho m} \right)^{1/2} x, \qquad (6)$$

где m — масса соответствующего сорта молекул. Поскольку x приблизительно постоянно, то и верхний и нижний пределы прямо пропорциональны $(T/\varrho)^{1/2}$.

Мы можем сделать предварительный вывод, что радиус обитаемой планеты скорее всего заключен между 1000 и 20 000 *км*. Этот интервал обладает запасом, так как он включает Луну и Меркурий — планеты, которые известны как необитаемые. Поведа предположил недавно, что скорость биологической эволюции на планете при прочих равных условиях увеличивается с увеличением ее площади. Если это действительно так, то Земля обладает не только преимущественным положением в солнечной системе, но и размерами, дающими преимущества для развития живых организмов.

Наконец, следует отметить, что диссипация атмосферы является очень сложным процессом. Не следует думать, что изложенные соображения применимы к диссипации водорода из земной атмосферы в настоящее время, поскольку водород в земной атмосфере уже не является свободным. Скорость убегания водорода в настоящее время фактически определяется скоростью диффузии водородсодержащих молекул (например, H_2O) из нижних в верхние слои атмосферы и эффективностью диссоциации этих молекул в верхней атмосфере [3]. К счастью, для наших задач не требуется рассматривать эту сторону проблемы, так как считается, что любая атмосфера, подобно земной, потеряла свободный водород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опарин А. И., Происхождение жизни на Земле, М., Воениздат, 1959.
2. Urey H. C., The Planets, New Haven, 1952.
3. Urey H. C., Handbuch der Physik, Bd. 52, 1959, S. 363.

4. Brown H., in «The Atmospheres of the Earth and Planets», Ed. G. P. Kuiper, Chicago, 1952, Ch. 9.
5. Huang S.-S., Am. Scientist, **47**, 397 (1959); Publ. Astron. Soc. Pacific, **71**, 421 (1959).
6. Шкловский И. С., Докл. АН СССР, **76**, 193 (1951); Астрон. ж., **29**, 225 (1952).
7. Jeans J. H., The Dynamical Theory of Gases, N. Y., 1925, Ch. 15.
8. Spitzer L., in «The Atmospheres of the Earth and Planets», Ed. G. P. Kuiper, Chicago, 1952, Ch. 7. (Имеется русский перевод 1-го изд.: Атмосферы звезд и планет, М., ИЛ, 1950.)

А. Дж. У. Камерон

10 ЗОНЫ ОБИТАЕМОСТИ У ЗВЕЗД

В статье «Жизнь во Вселенной» (стр. 87—95) Су-Шу Хуанг открывает дискуссию по очень интересному вопросу об определении вероятности того, что планеты находятся в том интервале расстояний, температура в котором благоприятна для развития жизни. Назовем этот интервал расстояний зоной обитаемости у данной звезды. В своей статье Су-Шу Хуанг делает важное допущение о том, что вероятность найти планету в некотором положении относительно звезды пропорциональна либо элементу площади в плоскости орбиты, либо элементу объема в пространстве. Такие предположения соответствуют тому, что можно назвать «принципом минимума сведений».

Задача нашей заметки — показать, что допущения, сделанные Су-Шу Хуангом, не реализуются в случае солнечной системы. Следовательно, необходимо найти другой критерий, который находится в соответствии с нашими знаниями о солнечной системе, так как это единственная планетная система, знания о которой можно обобщить.

В табл. 1 содержатся соответствующие данные. В ней приведены расстояния планет от Солнца и спутников от некоторых планет, имеющих большие системы спутников. Не включались спутники с очень нерегулярными орбитами. Последний столбец таблицы содержит результаты приближенной оценки доли расстояния, в пределах которого данная планета или спутник могут считаться доминирующими. Эти величины были вычислены путем

Таблица 1

Интервалы радиальных расстояний для планет и спутников

Главное тело	Вторичное тело	Расстояние *	$\Delta r/r$
Солнце	Венера	0,723	0,443
	Земля	1,000	0,390
	Марс	1,524	0,538
	Церера	2,767	0,628
	Юпитер	5,203	0,625
	Сатурн	9,539	0,915
	Уран	19,19	0,778
Юпитер	Ио	5,905	0,606
	Европа	9,401	0,470
	Ганимед	14,995	0,534
Сатурн	Энцелад	3,99	0,231
	Фетида	4,94	0,235
	Диона	6,33	0,300
	Рея	8,84	0,672
	Титан	20,48	0,445
	Гиперион	24,82	0,643
Уран	Умбриель	10,2	0,440
	Титания	16,8	0,375

* Единицы измерения: *астрономическая единица* для планет и *радиус планеты* — для ее спутников.

разделения «сфер влияния» планет или спутников как средние геометрические расстояний от них и от их ближайших соседей (внутренних и внешних). Если Δr — расстояние между этими границами, а r — расстояние от планеты или спутника, то $\Delta r/r$ есть относительный размер «сферы влияния».

Из данных табл. 1 видно, что $\Delta r/r$ подвержено некоторым изменениям. Оно должно сложным образом зависеть от масс центрального тела, рассматриваемого тела и его соседей. Несмотря на это, вариации невелики. Для настоящей дискуссии достаточно сказать, что $\Delta r/r \approx 0,5$ для планет солнечной системы, а также для трех из регулярных

систем спутников. Суть заключается в том, что «сферы влияния» представляют собой области, из которых может быть собрано вещество для образования планет или спутников или из которых вещество может быть выброшено благодаря возмущениям за 4,5 млрд. лет (за исключением Цереры).

Высказанное утверждение можно сделать более определенным и обобщить, приняв в качестве гипотезы, что вблизи любой звезды, имеющей планеты, число планет между радиальными расстояниями r_1 и r_2 равно

$$N = 2\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right). \quad (1)$$

Далее следует найти, сколько планет может существовать в зонах обитаемости у различных звезд. Теперь r_1 означает расстояние от звезды, при котором планета еще достаточно холодна, а r_2 — расстояние, при котором она еще достаточно горяча, чтобы поддерживать жизнь. Эти расстояния, по-видимому, зависят от размера планеты (если вообще жизнь на ней может существовать при определенных условиях), но мы не будем учитывать эффектов второго порядка.

Температура быстро вращающегося черного тела

$$T = \left(\frac{L}{16\pi\sigma r^2}\right)^{1/4}, \quad (2)$$

где σ — постоянная излучения, L — светимость звезды, r — радиус орбиты тела. Из (1) и (2) определится число планет в интервале температур T_1 и T_2:

$$N = 4\ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right). \quad (3)$$

Значение (3) определяется тем фактом, что T_1 и T_2 — фиксированные значения температур, определяющие пределы, в которых может существовать жизнь. Светимость звезды не входит в это уравнение. Отсюда следует, что каждая зона обитаемости содержит в среднем одно и то же число планет независимо от класса звезды (исключая, однако, двойные звезды). Мы не отметили еще, что планеты должны иметь подходящие массы, чтобы на них могла существовать жизнь. Можно подозревать, что массы планет сильно различаются по величине, даже для данного класса звезд.

Найдем теперь количество планет в зоне обитаемости звезды. Мы опять будем опираться на соотношения, наблюдаемые в солнечной системе.

Исследования радиоизлучения Венеры показали, что ее поверхностная температура составляет около 600° K, т. е. на 200° K выше, чем ожидалось для абсолютно черного тела. Высокая поверхностная температура может быть обусловлена парниковым эффектом в атмосфере и зависеть от довольно большой массы атмосферы планеты. Детали этого явления еще не изучены. Если бы не существовал парниковый эффект, то температура, вероятно, была бы подходящей для развития жизни, по меньшей мере в некоторых частях планеты. Однако по причине фактически высокой поверхностной температуры следует исключить Венеру из числа членов солнечной зоны обитаемости и принять $r = 0{,}8$ а. е.

Одна из величайших задач в исследовании космического пространства заключается в решении проблемы — есть ли жизнь на Марсе? Условия на этой планете представляются несколько суровыми, но не слишком. Они были бы менее суровы, если бы Марс обладал большей массой. Но Марс должен находиться вблизи внешней границы зоны обитаемости в солнечной системе, поэтому положим $r_2 = 1{,}6$ астрономических единиц. Тогда из (1) $N = 1{,}4$.

Имеется одно ограничение, которое нужно исследовать прежде, чем обобщать полученный вывод. Необходимо выяснить, была ли когда-то зона обитаемости звезды внутри последней, например, на стадии сжатия звезды. Это сделало бы невозможным образование планет в зоне, пригодной для жизни. Согласно нашим выводам (см. стр. 24), максимальный радиус, который когда-либо имела звезда, определяется условием полной ионизации водорода и гелия во всем объеме звезды. Дилкан, Эзер и автор нашли недавно, что этот радиус в 57 раз больше современного радиуса Солнца, т. е. равен 0,266 а. е. Легко видеть, что это, по-видимому, препятствовало образованию другой планеты внутри орбиты Меркурия (0,387 а. е.).

Этот максимальный радиус звезды прямо пропорционален ее массе. Из (2) мы видим, что радиус r_1 внутренней границы зоны обитаемости меняется как корень квадратный из светимости звезды. Следовательно, с уменьшением массы и связанной с ней светимости звезды эта граница должна приближаться к максимальному звездному радиусу (для близких к Солнцу звезд светимость приблизительно пропорциональна корню четвертой степени из массы).

Однако внутренняя граница зоны обитаемости для слабых красных карликов класса M5 все-таки приблизительно в 1,4 раза превосходит максимальный радиус звезды. Для еще менее массивных звезд данные о массах и светимостях очень ненадежны, но представляется вероятным, что зоны обитаемости не исчезают вплоть до очень поздних карликов класса M с массами около 10% массы Солнца.

Итак, мы приходим к окончательному выводу о том, что все одиночные звезды (исключая звезды с очень низким содержанием тяжелых элементов) имеют зоны обитаемости, которые содержат в среднем 1,4 планеты независимо от размера.

Су-Шу Хуанг предположил, что вероятность найти жизнь вблизи звезд в пределах 5 *парсек* наиболее велика для ε Эридана и τ Кита. Но в пределах этого радиуса существуют еще 26 других одиночных звезд меньшей массы, каждая из которых, согласно изложенному выше анализу, с такой же вероятностью может иметь планеты, пригодные для жизни.

Ф. Дж. Дайсон

11 ПОИСКИ ИСКУССТВЕННЫХ ЗВЕЗДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Коккони и Моррисон [1] обратили внимание на важность и возможности приема радиосигналов, передаваемых *внеземными разумными существами. Они полагают,* что приемные антенны следует направить на соседние звезды, которые могут быть окружены планетами, населенными такими существами. Это предложение осуществляется [2].

Задача настоящей заметки — рассмотреть другие возможности, которые должны быть изучены при планировании сколько-нибудь серьезного поиска внеземных разумных существ. Начнем с замечания, что шкала времени промышленного и технического развития этих цивилизаций, по-видимому, должна быть значительно меньше шкалы времени звездной эволюции. Поэтому в высшей степени вероятно, что любые существа, сигналы которых мы наблюдаем, существуют уже несколько миллионов лет и уже достигли на несколько порядков более высокого технологического уровня по сравнению с нами. Тогда в качестве рабочей гипотезы можно принять, что их область обитания распространилась до пределов, определяемых наличными ресурсами сырья и энергии.

Мы не располагаем прямыми данными о материальных условиях, с которыми столкнулись бы такие цивилизации в поисках «жизненного пространства». Поэтому постараемся представить вероятный ход событий в том случае, если эти существа возникли в солнечной системе, аналогичной нашей. Взяв в качестве модели нашу солнечную

систему, мы по крайней мере получим возможную картину того, что́ может произойти в другой обитаемой системе. Мы не утверждаем, что то же произойдет и в солнечной системе; мы считаем только, что это может произойти в другой планетной системе.

Единственные материальные факторы, которые ограничивают рост технически развитых цивилизаций,— это источники сырья и энергии. В настоящее время материальные ресурсы, которые доступны человеческому использованию, ограничены, грубо говоря, биосферой Земли с массой порядка $5 \cdot 10^{19}$ *г*. Наш современный расход энергии можно приближенно оценить в 10^{20} *эрг/сек*. Потенциальные количества вещества и энергии, которые доступны использованию в пределах солнечной системы, составляют $2 \cdot 10^{30}$ *г* (масса Юпитера) и $4 \cdot 10^{33}$ *эрг/сек* (полный выход энергии Солнца).

Читатель может задать вопрос, в каком смысле можно говорить о доступности для использования массы Юпитера или полного излучения Солнца.

Приведем аргументы в пользу того, что практическое использование этих ресурсов не является абсурдом. Прежде всего время, которое требуется для увеличения населения и роста промышленности в 10^{12} раз, очень мало, примерно 3000 лет, если скорость роста составляет 1% в год. Во-вторых, энергия, требующаяся для разрушения и восстановления планеты размером с Юпитер, составляет около 10^{44} *эрг*, что равно энергии, излучаемой Солнцем за 800 лет. В-третьих, если массу Юпитера распределить по сферическому слою, вращающемуся вокруг Солнца на расстоянии, вдвое большем расстояния Земли от Солнца, то удельная плотность слоя была бы равна 200 *г/см*^{2} (при толщине от 2 до 3 *м* в зависимости от плотности). Сфера такой толщины была бы вполне пригодна для жизни и могла бы содержать оборудование для использования солнечной радиации, падающей на этот слой изнутри.

Замечательно то, что шкала времени технического развития, масса Юпитера, выход энергии Солнца и размеры биосферы соответствуют друг другу по порядку величины. Представляется разумным ожидать, что только настоятельные потребности развития заставят разумные

существа приступить к полному использованию имеющихся ресурсов. Следует ожидать, что через несколько тысяч лет после вступления в стадию промышленного развития разумные существа освоят всю биосферу вокруг своей звезды.

Если принять предыдущий аргумент, то поиски внеземных цивилизаций не следует ограничивать окрестностями видимых звезд. Наиболее вероятной областью их обитания должен быть темный объект размером с земную орбиту и с поверхностной температурой от 200 до 300° К. Такой темный объект излучал бы так же, как и звезда, заключенная внутри его, но излучение было бы инфракрасным в области волны 10 *мк*.

К счастью, атмосфера Земли прозрачна в области длин волн от 8 до 12 *мк*. Поэтому возможно искать «инфракрасные звезды» в этом интервале длин волн с земной поверхности с помощью существующих телескопов. Излучение Марса и Венеры в этом интервале было не только обнаружено, но и изучено путем спектроскопического анализа [3].

Поиски точечных источников инфракрасного излучения можно осуществлять или независимо, или в сочетании с поиском искусственного радиоизлучения. Желательно выполнить обзор всего неба до объектов 5-й или 6-й звездной величины, но эта задача выходит за пределы возможностей современной техники. Если невозможен ненаправленный обзор, то в качестве предварительных измерений было бы важно исследовать аномально высокое излучение в диапазоне 10 *мк*, связанное с видимыми звездами. Такое излучение может быть обнаружено вблизи видимых звезд при выполнении одного из двух условий. Разумные существа могут быть не в состоянии использовать полностью всю энергию, излученную их звездой, из-за недостатка имеющегося в их распоряжении вещества, или же они могут жить в искусственной биосфере, окружающей одну из звезд кратной системы, в которой одна или более компонент непригодны для такого применения и могут быть видимыми для нас. Невозможно заранее предсказать вероятность того, какая из этих возможностей реализуется в конкретном случае внеземной цивилизации. Но целесообразно начать поиск

инфракрасного излучения искусственного происхождения в направлении ближайших видимых звезд и особенно в направлении звезд, которые известны как двойные, имеющие невидимых спутников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cocconi G., Morrison P., Nature, **184**, 844 (1959).
2. Science, **131**, 1303 (1960).
3. Sinton W. M., Strong J., Astrophys. J., **131**, 459, **470** (1960).

Ф. Дж. Дайсон

12 ГРАВИТАЦИОННЫЕ МАШИНЫ

Трудности построения машин для использования энергии гравитационного поля — это целиком и полностью трудности масштабные. Гравитационные силы между объектами с размерами, которые нам доступно создать, настолько ничтожны, что их едва можно измерить, не говоря уже об их эксплуатации. Чтобы давать полезный выход энергии, каждая машина должна достигать в буквальном смысле астрономических масштабов. Несмотря на это, очень важно поставить вопрос о гравитационных машинах по двум причинам. Во-первых, если наше общество будет продолжать развивать технику и увеличивать население по экспоненциальному закону, то может наступить время, когда построение сооружений астрономических размеров будет как возможно, так и необходимо. Во-вторых, если мы пытаемся обнаружить признаки технологически развитой цивилизации, уже существующей где-то во Вселенной, то полезно рассмотреть вопрос, какого типа наблюдаемые явления способна породить действительно развитая цивилизация.

Описанная ниже система иллюстрирует принцип, который мог бы лечь в основу работоспособной гравитационной машины (рис. 1). Двойная звезда состоит из компонент A и B, каждый с массой M, вращающихся друг вокруг друга по круговой орбите с радиусом R. Скорость каждой звезды

$$V = \left(\frac{GM}{4R} \right)^{1/2}, \qquad (1)$$

где

$$G = 6{,}7 \cdot 10^{-8}\ см^3/сек^2 \cdot г \qquad (2)$$

— гравитационная постоянная. Эксплуатирующие такую машину существа живут на планете или искусственном теле P, которое вращается вокруг двойной звезды по орбите с радиусом много больше R. Они запускают малую

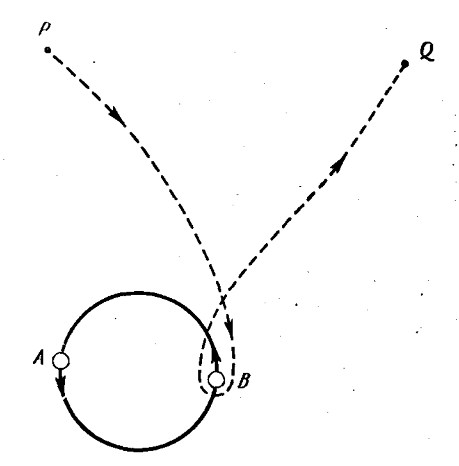


Рис. 1. Сплошной линией показана орбита звезд A и B, пунктиром — орбита тела C.

массу C по направлению к двойной звезде, причем из P это тело стартует с малой скоростью. Орбита тела C рассчитывается таким образом, что оно близко приближается к B в тот момент, когда компонента B движется навстречу приближающемуся телу. В этом случае масса C совершает оборот вокруг звезды и улетает со значительно большей скоростью. Эффект почти таков же, как если бы тело C претерпело упругое столкновение с движущейся большой массой B. Масса C придет в удаленную точку Q со скоростью несколько выше $2V$. В точке Q тело C может быть встречено и его кинетическая энергия может быть превращена в полезную работу. Другой вариант заключается в использовании системы для разгона тел, причем в этом случае тело C просто продолжает движение со скоростью $2V$ до своего назначения. Последним может служить аналогичная система, расположенная на большом расстоянии, которая тормозит тело C с помощью того же механизма.

Легко представить себе такую систему, работающую непрерывно благодаря целому кольцу точек старта P и конечных точек Q вокруг двойной звезды, причем массы C непрерывным потоком стартуют внутрь и выбрасываются наружу с увеличенной скоростью. Источником энергии такой машины является гравитационный потенциал тел A и B. По мере работы машины звезды A и B будут постепенно сближаться, их отрицательная потенциальная энергия и орбитальная скорость V будут расти. Машина будет извлекать энергию за счет взаимного притяжения компонент до тех пор, пока они не станут настолько близки друг к другу, что станут невозможными проходящие между ними орбиты. Для грубой оценки можно предположить, что машина может работать до тех пор, пока расстояние между центрами двух звезд не станет равно $4a$, где a — радиус каждой звезды. Тогда полная энергия, извлекаемая машиной из гравитационного поля, равна

$$E = \frac{GM^2}{8a}\,. \qquad (3)$$

Если A и B — обычные звезды типа Солнца, то радиус a составляет около 10^{11} *см*. Энергия E равна в этом случае световой энергии, излучаемой звездами за несколько миллионов лет. В таких условиях имеющаяся гравитационная энергия может быть использована, но она мала по сравнению со световой энергией системы. Высокоразвитая цивилизация направит свои усилия на покорение лучистой энергии.

Если же A и B — типичные белые карлики, то ситуация в корне изменяется. В этом случае оптическая светимость меньше солнечной приблизительно в 1000 раз, в то время как запас гравитационной энергии в 100 раз выше, чем для Солнца в подобной системе. Поэтому логично ожидать, что вблизи двойной звезды с компонентами-карликами может процветать цивилизация, использующая гравитационную энергию системы. Для иллю-

страции положим:

$$M = 1 \text{ масса Солнца} = 2 \cdot 10^{33}\ г, \quad (4)$$

$$a = 10^9\ см, \quad (5)$$

$$R = 2a = 2 \cdot 10^9\ см. \quad (6)$$

Тогда получим

$$V = 1{,}3 \cdot 10^8\ см/сек, \quad (7)$$

$$E = 3 \cdot 10^{49}\ эрг. \quad (8)$$

Период орбитального вращения двойной звезды

$$P = 100\ сек. \quad (9)$$

Поиск затменных переменных со столь коротким периодом среди известных белых карликов был предложен Расселом [1] много лет назад. Поиски, выполненные впоследствии Ленувелем [2], дали отрицательный результат. Отрицательный результат не удивителен, так как полное число отождествленных белых карликов очень мало.

Состоящая из белых карликов двойная звезда с параметрами (4) — (9) обладала бы тем интересным свойством, что она могла бы ускорять легкие и непрочные объекты до скорости 2000 *км/сек* с ускорением $10\,000g$ без помощи ракетных двигателей и без риска повредить ускоряемый объект. Единственными внутренними силами, действующими на ускоряемые объекты, были бы приливные напряжения, вызываемые градиентами гравитационных полей. Если полный диаметр объекта равен d, максимальное приливное ускорение будет порядка

$$A = \frac{GMd}{a^3} = \frac{1}{8} d. \quad (10)$$

Если положить A равным ускорению земного тяготения, то $d = 80$ *м*. Таким путем большой космический корабль с человеком на борту и нормальной механической конструкции мог бы легко перенести ускорение в $10\,000g$. Можно себе представить, что высокоразвитые цивилизации могут использовать состоящие из белых карликов двойные звезды, рассеянные по Галактике, в качестве станций при дальней транспортировке тяжелых грузов.

Важный побочный эффект в короткопериодической двойной звезде, состоящей из белых карликов,— это огромный выход гравитационного излучения. Согласно теории [3] (которая, правда, не является общепринятой), пара звезд одинаковой массы, движущихся по кривой орбите, излучает гравитационную энергию со скоростью

$$W = \frac{128 V^{10}}{5 G c^5}, \quad (11)$$

где c — скорость света. Было бы чрезвычайно важно наблюдать это излучение как для проверки теоретической формулы (11), так и для обнаружения существования двойных, состоящих из белых карликов. Подставляя значение V из (7) в (11), получаем

$$W = 2 \cdot 10^{37}\ эрг/сек, \quad (12)$$

что в 5000 раз выше оптической светимости Солнца. Сравнивая (12) с (8), мы видим, что само гравитационное излучение ограничивает время жизни такой системы пределом около 40 000 лет. Однако ввиду столь сильной зависимости W от V двойная звезда с $V = 5 \cdot 10^7$ *см/сек* существовала бы несколько миллионов лет. Тогда технически развитая цивилизация может выбрать величину V, чтобы совместить ее со своими задачами.

Если источник гравитационных волн с интенсивностью, определяемой выражением (12), находится на расстоянии 100 *пс*, то сигнал на Земле будет иметь интенсивность

$$I = 2 \cdot 10^{-5}\ эрг/см^2 \cdot сек. \quad (13)$$

К сожалению, период излучения около 100 *сек* недостаточно короток, чтобы его можно было наблюдать с помощью существующего аппарата Вебера [4]. Однако в высшей степени вероятно, что можно было бы создать детектор, который чувствовал бы падающий поток (13) за период 100 *сек*. Тогда это позволило бы нам обнаружить гравитационное излучение какой-либо двойной, состоящей из белых карликов и имеющей период 100 *сек*, в объеме пространства, содержащем свыше полумиллиона звезд [1]).

[1]) Крафт, Мэттьюс и Гринстейн изучили чрезвычайно интересный объект — Новую WZ Стрельца, двойную звезду со спутником белым карликом и скоростью обращения $7 \cdot 10^7$ *см/сек*. Они отмечают, что гравитационное излучение от этого объекта может быть обнаружено.

Согласно теории [5], белый карлик не является наиболее плотной из возможных типов звезд. Еще более сжатое состояние вещества может реализоваться в «нейтронных звездах», которые, имея массу порядка солнечной, могут тем не менее быть сжаты до радиуса 10 *км*. Существуют ли в действительности нейтронные звезды — неизвестно; они были бы слишком слабыми объектами, и тот факт, что до сих пор они не обнаружены, не является веским доводом против их существования.

Если бы где-то из пары нейтронных звезд образовалась двойная система, последствия действительно были бы *очень интересными. Рассмотрим, например,* пару звезд с массами порядка солнечной, с радиусами

$$a = 10^6 \text{ см} \qquad (14)$$

и с расстоянием между их центрами $2R = 4a$. Согласно (1) и (11), каждая звезда движется со скоростью

$$V = 4 \cdot 10^9 \text{ см/сек} \qquad (15)$$

с периодом 5 *мсек*, а выход гравитационного излучения

$$W = 2 \cdot 10^{52} \text{ эрг/сек}. \qquad (16)$$

Но ввиду (3) гравитационная энергия звездной пары в этот момент

$$E = 3 \cdot 10^{52} \text{ эрг}. \qquad (17)$$

Таким образом, вся гравитационная энергия излучается в коротком импульсе, длящемся менее 2 *сек*. Двойная нейтронная звезда, образовавшаяся при большем расстоянии между компонентами, просуществует дольше, но конец ее будет таков же. Согласно (11), потери энергии на гравитационное излучение ведут к сближению обеих звезд, сопровождающемуся увеличением орбитальной скорости и продолжающемуся до тех пор, пока в последнюю секунду своего существования они соединятся вместе и дадут невообразимой силы гравитационный взрыв на частоте около 200 *гц*.

Импульс гравитационного излучения с интенсивностью (17) на частоте около 200 *гц* был бы обнаружен с помощью оборудования Вебера [4] до расстояний порядка 100 *Мпс*. «Предсмертный крик» двойной нейтронной звезды был бы слышен на Земле, если бы это событие произошло в одной из 10 миллионов галактик! Было бы важно следить за появлением таких явлений с помощью аппаратуры Вебера или какой-то его модификации.

Очевидно, высокий темп потерь энергии на гравитационное излучение является препятствием к эффективному использованию нейтронных звезд в качестве гравитационных машин. Может оказаться, что это устанавливает естественный предел около 10^8 *см/сек* для скоростей, которые удобно использовать в гравитационной технике. Однако трудно представить, чтобы высокоразвитые цивилизации не смогли построить неизлучающую гравитационную машину и таким образом использовать значительно более высокие скорости, которые в принципе реализуются нейтронными звездами.

В заключение можно сказать, что динамика звездных систем в условиях, когда гравитационное излучение существенно, является совершенно запущенной областью исследования. Во всякий поиск признаков существования во Вселенной развитых цивилизаций должно быть включено исследование аномально интенсивных источников гравитационного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Russel H. N., Centennial Symposia, Harvard Monographs, **7**, 187 (1948).
2. Lenouvel F., J. Observateurs, **40**, 15 (1957).
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Классическая теория поля, М.-Л., 1950.
4. Weber J., Phys. Rev., **117**, 306 (1960).
5. Oppenheimer J. R., Volkoff G. M., Phys. Rev., **55**, 374 (1939); Cameron A. G. W., Astrophys J., **130**, 884 (1959).

Э. Парселл

13 РАДИОАСТРОНОМИЯ И СВЯЗЬ ЧЕРЕЗ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

РАДИОАСТРОНОМИЯ

Еще 15—20 лет назад вся информация, которую получал человек о внешнем мире за пределами Земли, приходила в узком диапазоне длин волн видимого света. Все, что видели астрономы, все изображения на их фотографических пластинках получались путем сбора света в диапазоне длин волн, изменяющемся не более чем в два раза от самой короткой до самой длинной волны. Около двух десятилетий назад было сделано открытие, что к нам приходят также и радиоволны; это положило начало радиоастрономии.

Эти два больших «окна», как их часто называют, показаны на рис. 1, на котором изображен спектр поглощения атмосферы Земли в диапазоне длин волн, начинающемся от очень коротких волн в ультрафиолетовой области через видимую область вплоть до диапазона радиоволн. Почти во всем этом диапазоне, за исключением двух областей, либо атмосфера, либо ионосфера поглощают 100% падающего излучения. Только в этих двух областях спектра наша атмосфера что-то пропускает. «Радиоокно» охватывает область длин волн от нескольких сантиметров до нескольких метров. В этой области электромагнитные волны, испускаемые любым небесным телом, могут достигать наших антенн на Земле. Радиоастрономия включает много отраслей, так как излучение приходит к нам от самых разнообразных объектов. Очень много энергии в форме радиоволн приходит от Солнца;

радиоволны приходят от звезд и многочисленных и весьма необычных астрономических объектов. Я ограничусь лишь одной отраслью радиоастрономии — изучением структуры Галактики, т. е. Млечного Пути, с помощью радиоволн. Моя цель заключается в том, чтобы показать, как много информации можно получить с огромных расстояний и ничтожной энергией.

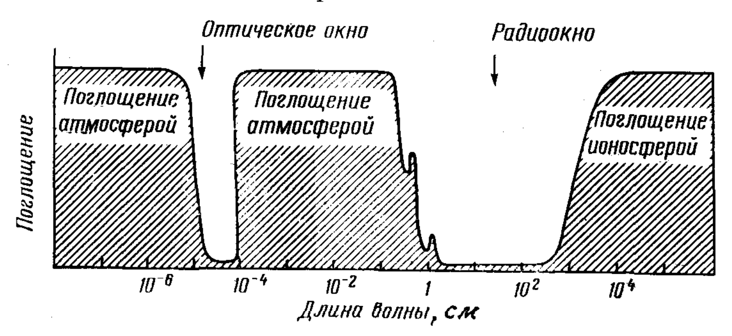


Рис. 1. Спектр поглощения земной атмосферы в зависимости от длины волны.

Для начала давайте уясним свое место во Вселенной, взглянув на какую-нибудь галактику (рис. 2). Ни одно обсуждение, подобное нашему, не будет полным без картины спиральной туманности. Эта туманность является одной из самых красивых и, кроме того, вероятно, очень похожа на нашу Галактику. Конечно, это не та самая галактика, в которой живем мы, иначе мы не смогли бы получить этот снимок. Это большое уплощенное скопление около 100 миллиардов звезд, видимое несколько сбоку. Форма ее не отличается правильностью. Видны слабо выраженные ветви, выходящие по спирали; это спиральная туманность. Имеются сотни и тысячи галактик этого типа. В одной из них живем и мы. Хотя Галактика, в которой мы живем, является обычной, однако она интересует нас в первую очередь, и мы хотим знать, как она выглядит. Выяснить это чрезвычайно трудно, так как мы не можем видеть ее со стороны. Я опишу нашу Галактику, показав, как она может выглядеть с ребра; на рис. 3 показан разрез «диска».

В объекте такого типа содержится около 10^{11} звезд; Солнце является одной из них и расположено у края, на расстоянии около 25 000 световых лет от центра. Толщина всего диска примерно 700 световых лет. Кроме звезд, в Галактике имеется пыль (мелкие частицы твердого вещества) и атомы водорода. Водородные атомы содержатся в количестве одного атома в кубическом сантиметре



Рис. 2. Спиральная туманность.

во всем пространстве, где нет звезд. Я несколько забежал вперед, однако эти сведения помогут уяснить дальнейшее. Звезды составляют бо́льшую часть массы Галактики, однако и атомами водорода нельзя пренебречь — они составляют $^1/_3$ — $^1/_4$ массы всего образования. Масса пыли несущественна, однако она почти полностью поглощает видимый свет этой большой ассоциации звезд. В телескоп, расположенный в месте нахождения Солнца или Земли, для большинства направлений можно видеть лишь на небольшое расстояние в глубь Галактики, так как луч зрения

уже на небольшом расстоянии упирается в облака пыли. С помощью телескопа или глаза нельзя увидеть общей структуры. Но если бы это было возможно, Млечный Путь, т. е. то, что мы видим от Галактики с нашего места, представлял бы совершенно другое зрелище. Это была бы очень узкая, очень яркая полоса, идеально прямая, пересекающая небо по большому кругу. Мы находимся внутри

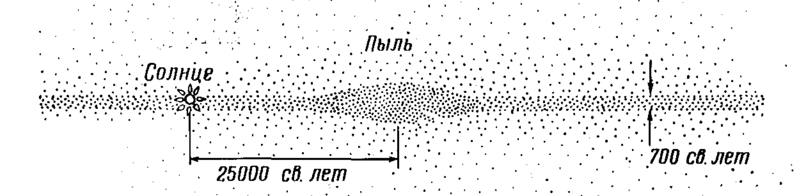


Рис. 3. Наша Галактика, видимая с ребра.

этого «блина» вблизи края и можем видеть с помощью телескопа лишь часть «блина» в наших ближайших окрестностях. Вот почему, пока не было инструментов для исследования «глубин» этой системы, мы имели очень слабое представление о деталях ее структуры. Частицы пыли вследствие своей чрезвычайной малости не препятствуют распространению радиоволн. Радиоволны длиной 1 *м* проходят мимо мельчайших частиц пыли без малейшего искажения и идут дальше как через пустое место. Таким образом, «блин», вообще говоря, совершенно прозрачен для радиоволн, и если там имеется их источник, то его можно наблюдать, как бы далеко он ни находился в диске звезд и газа.

Существуют радиоволны, которые излучаются самим газом; я хочу в общих чертах описать их происхождение, прежде чем рассказать, что из этого получается (рис. 4).

Атом водорода, который состоит из электрона и протона, имеет характерную для него естественную частоту,

попадающую в радиодиапазон. Эта частота равна 1420 *Мгц* что соответствует длине волны 21 *см*. Она возникает благодаря магнитному взаимодействию между электроном и протоном. Облако на рис. 4 изображает электрон,

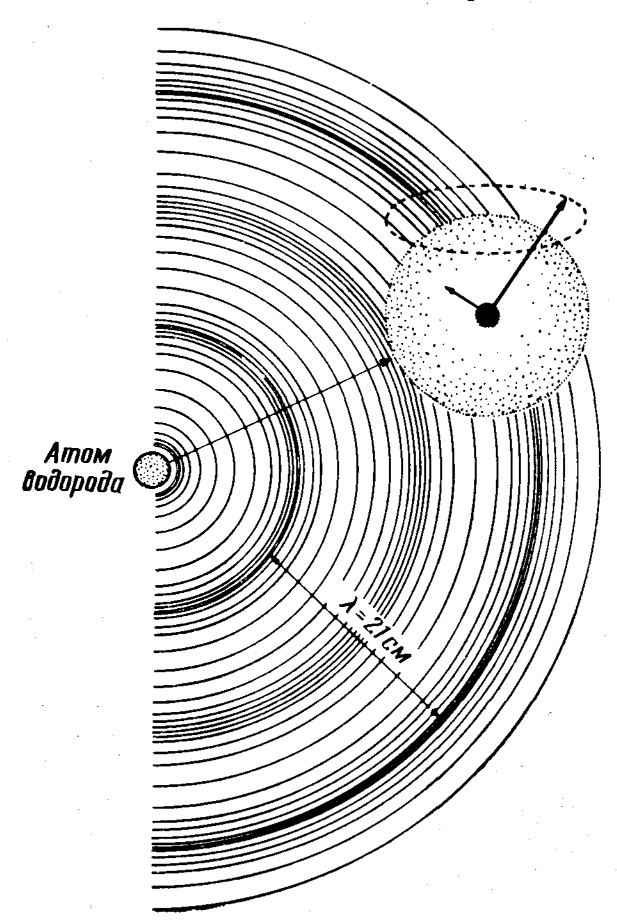


Рис. 4. Атом водорода испускает радиоволны.

а стрелка — ось, вокруг которой электрон вращается. Протон также вращается вокруг оси. Благодаря этому

вращению каждая частица ведет себя как магнитик. Эти два маленьких магнита стремятся установиться параллельно, но из-за вращения это состояние не достигается. Поэтому они прецессируют как гироскопы. В атоме водорода, изолированном в свободном пространстве при отсутствии каких-либо возмущений и находящемся в состоянии с минимальной энергией, ось вращения электрона спокойно прецессирует с частотой 1 420 405 750 *гц*.

Конечно, длина этого числа не имеет отношения к теме обсуждения, но мне хотелось его выписать, чтобы показать, какого рода измерения производятся в той отрасли физики, которая измеряет эти атомы в лаборатории. Это число получено в процессе экспериментальных измерений, а не является теоретическим вроде числа π. В настоящее время в кругу ученых ведется дискуссия о последних двух цифрах. Но в то же время появились недавно новые достижения, которые дают уверенность в том, что через год-два в этом числе будет известно еще больше цифр. Вероятно, это одно из наиболее точных чисел во всей физике. Как будет видно дальше, этот факт ненамного способствует решению астрономических проблем, но некоторую пользу он приносит. Из рис. 1, на котором показано «радиоокно» в спектре, можно увидеть, что, к счастью, волна 21 *см* попадает как раз в середину провала, где практически нет поглощения ни в атмосфере, ни в ионосфере. Кроме того, атомы, излучающие эту частоту, оказываются самыми распространенными атомами во Вселенной. Водород в основном состоянии составляет около 65% газа в Галактике. Единственная трудность состоит в том, что излучение одного атома чрезвычайно слабо, так что нам как раз и нужно достаточно много водорода, чтобы получить ощутимые результаты.

В настоящее время работа в этой области очень интенсивна. Многие обсерватории исследуют излучение, приходящее от атомов водорода Галактики. Это делается с помощью обычных радиотелескопов. На рис. 5 показан радиотелескоп Национальной радиоастрономической обсерватории (Западная Виргиния). Это 25-метровый радиотелескоп, используемый как для изучения водорода, так и для других наблюдений; работающая на нем группа получает

прекрасные результаты. В старые времена мы работали кустарно; от тех времен у меня осталась фотография (рис. 6), на которой изображена первая антенна в Гарварде, предназначенная для линии 21 *см*, и Гарольд Ивен,

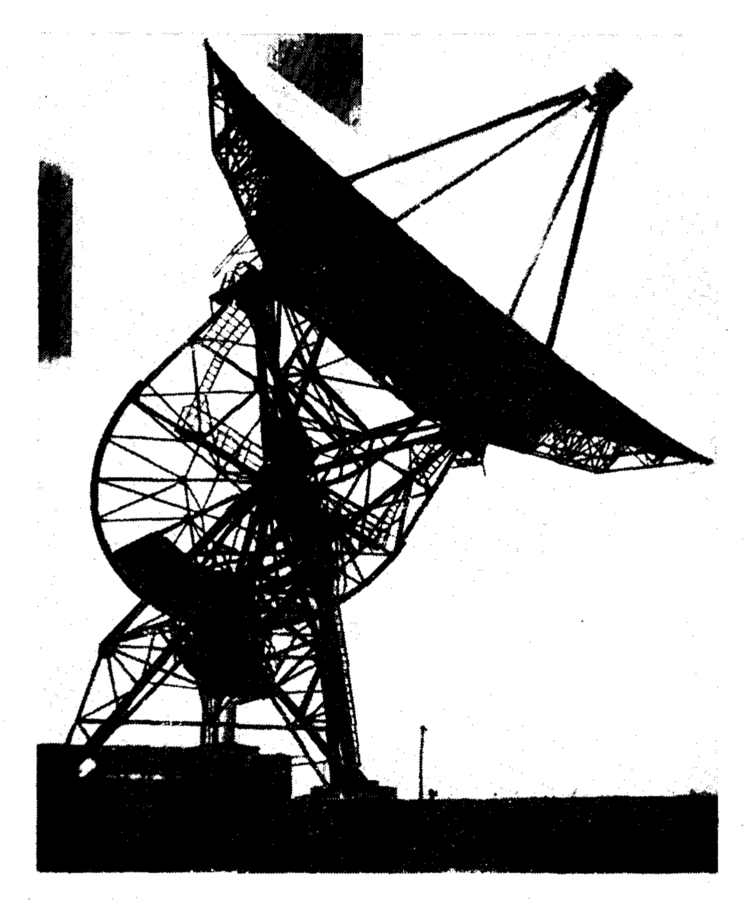


Рис. 5. Радиотелескоп.

проводивший эту работу. Эта антенна — простой рупор — была сделана нашим плотником и установлена на крыше; общая стоимость составляла около 400 долларов. Элек-

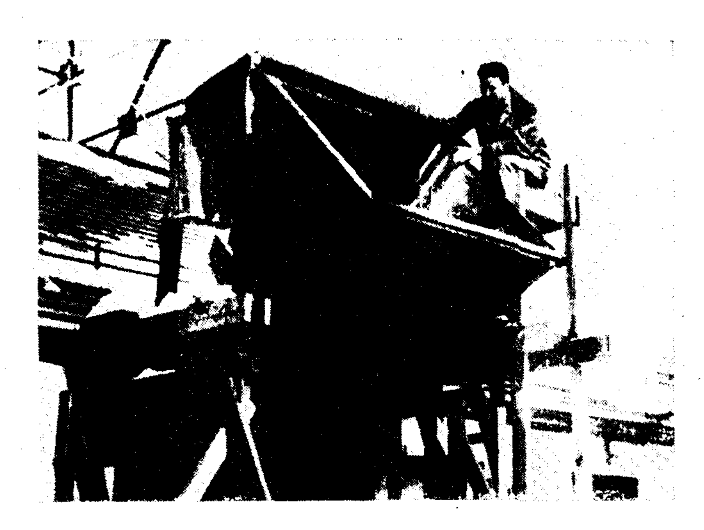


Рис. 6. Первый радиотелескоп в Гарварде для наблюдения излучения водорода.

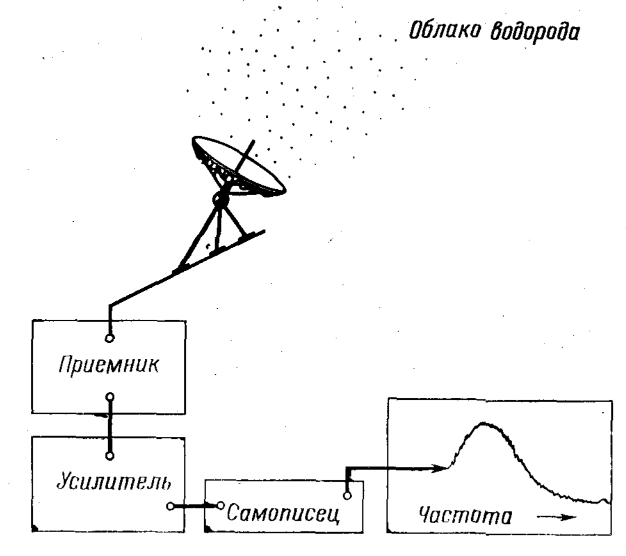


Рис. 7. Астрономия на волне 21 *см*.

троника была собрана из деталей и ее стоимость даже не подсчитывалась. Принцип такой астрономии очень прост; он иллюстрируется на рис. 7 без несущественных подробностей. Имеется радиоприемник и большая антенна. Большая антенна нужна для того, чтобы собрать больше энергии или смотреть на избранную область неба. Она подсоединена к довольно простому приемнику, в котором

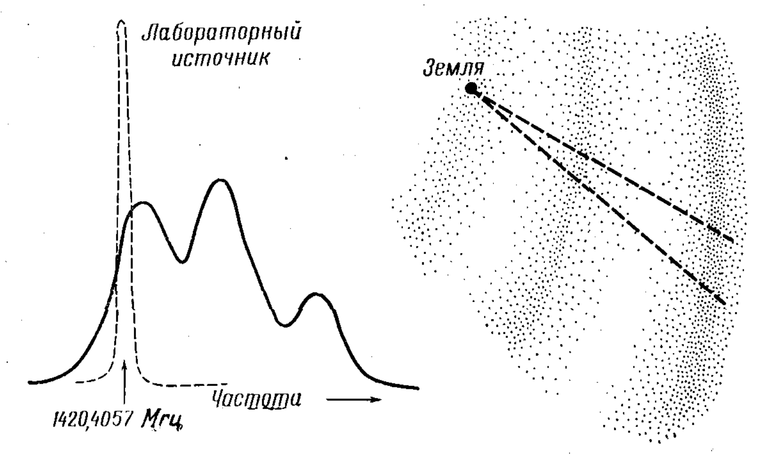


Рис. 8. Линия водорода от Галактики.

радиосигнал усиливается и каким-то способом записывается для определения его интенсивности. Разумеется, это не музыка, а просто шум. Регистрируется средняя энергия, приходящая в данном диапазоне длин волн. Самописец перемещает бумагу, и перо чертит график, показывающий, что на данной частоте происходит прием энергии. Вот и все, за исключением электроники, которая требует некоторой выдумки, если надо наилучшим образом использовать очень слабый сигнал. Нам нет необходимости вникать во все это.

Запись излучения, приходящего от облака водорода или от концентрации водорода Млечного Пути, имеет вид, показанный на рис. 8. Для водорода в лаборатории получится одна узкая линия, изображенная на рис. 8 пунктиром, точно на частоте, значение которой приводилось выше. В противоположность этому в Галактике

наблюдается другая картина, например трехгорбая кривая, изображенная на этом же рисунке. Причина этого проста: известный эффект Допплера. Водород, испускающий «свет», не находится в покое по отношению к нам. Он может двигаться или течь как целое. Мы знаем, что астрономические объекты обычно движутся. Если облако водорода приближается к нам, линия переместится на более высокую частоту, если оно удаляется — на более низкую частоту по сравнению с состоянием покоя относительно нашей антенны. В данном случае мы знаем (и я поясню несколько дальше, на основании чего мы это знаем), что три горба представляют собой излучение водорода, расположенного в трех различных местах; в каждом из этих мест водород движется с различной скоростью. И это почти все, что можно сказать; кое-что можно узнать также о температуре и плотности водорода, но нам это не понадобится.

Несмотря на ограниченность информации такого рода, астрономы, в особенности голландские Оорт и ван де Хюлст в Лейдене, нашли способ ее использовать. Между прочим, ван де Хюлст первым открыл возможность обнаружения излучения галактического водорода. Оорт и ван де Хюлст нашли способ, как по записям, подобным записи на рис. 8, определить действительное *местоположение* водорода на луче зрения. Надо помнить, что здесь мы имеем дело не с радиолокатором. Мы не посылаем волны и не получаем их обратно; нет никакого «времени запаздывания эха», которое сказало бы, как далеко находится вещество. Мы просто принимаем излучение и сразу можем сказать, с какой скоростью источник движется по направлению к нам или от нас. Для того чтобы определить местонахождение источника, нам нужно знать о Галактике кое-что еще.

Представим, что диск на рис. 9 — Галактика. Это просто облако, состоящее из звезд, и мы знаем, что оно не находится в покое, оно вращается. Астрономы знают об этом из наблюдений движения звезд. Но оно вращается не как целое (не как граммпластинка), поскольку звезды не связаны жестко одна с другой. Скорее, облако вращается подобно тому, как обращаются планеты вокруг Солнца: внешние планеты движутся сравнительно медлен-

но, а внутренние, более близкие к центральной массе,— с большей скоростью. В общем можно считать Галактику своего рода планетной системой. У нее нет единственного, главного тела в центре, однако имеется общая концентрация массы в центральной части диска. Скорость вращения должна изменяться с изменением расстояния от центра;



Рис. 9. Модель Галактики, на которой показаны места концентрации водорода.

это изменение мы можем легко предсказать, если знаем, как распределена масса. Начнем с предположения, что распределение массы зависит только от радиуса — это галактическая модель, которая является достаточно правдоподобной в свете других астрономических данных. Для такого распределения мы получим требуемую скорость вращения масс на любом расстоянии от галактического центра, т. е. видоизмененный «закон Кеплера» для данной системы.

Если мы теперь посмотрим в каком-нибудь направлении и увидим источник с какой-то скоростью, то сможем отнести его на определенное расстояние на луче зрения. При этом, разумеется, учитывается сделанное

нами предположение о распределении массы. Однако можно снова вернуться назад и продолжать так до тех пор, пока вся картина не будет согласована. Именно это и было проделано радиоастрономами в Голландии и Австралии, которые шаг за шагом построили карту водородного газа в Галактике.

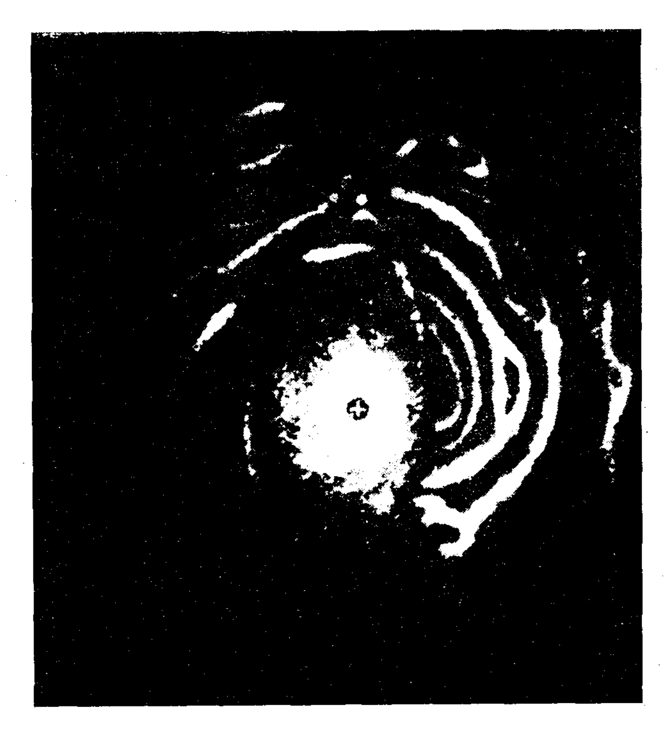


Рис. 10. Карта Галактики, построенная Вестерхаутом.

Рис. 9 является моделью Галактики, на которой показаны места концентрации водородного газа. Карта (рис. 10) составлена и опубликована Вестерхаутом (Лейден), который был одним из руководителей этого исследования. Вестерхаут по причинам, о которых нам нет необходимости знать, опустил центральную часть. В сере-

дине находится огромное количество водорода, но о нем известно немного. При изготовлении модели мы просто замазали центр, наставив туда пятен. Разумеется, они не имеют никакой связи с тем, что находится в центре Галактики на самом деле. Однако ветви реальны. Левая половина этой картины представляет результаты сиднейских радиоастрономов (Австралия). Они видят эту половину Галактики из южного полушария. Правая половина представляет результаты лейденской группы, возглавляемой Оортом, ван де Хюлстом и Вестерхаутом. Нет сомнения, что это спиральная туманность. Мы даже можем указать свое местоположение в одной из ветвей. Также очевидно, что это все еще эгоцентричная картина Галактики; нет причин, по которым ближайшая к нам половина должна выглядеть так отлично от дальней половины, за исключением того, что мы лучше видим первую.

Нам надо знать о модели еще кое-что, о чем я сейчас скажу. Это масштаб модели. Вероятно, то будет самый большой масштаб, которым когда-либо пользовались: 1 дюйм (2,5 *см*) = 300 световым годам. Такой же масштаб соответствует и толщине. Толщина пластины плексигласа в $^1/_4$ дюйма действительно представляет относительную толщину «блина» из звезд. И уплощенность также правильна. В выбранном масштабе водород распределен по плоскости с точностью до $^1/_{32}$ дюйма в большей части диска, что для астрономов было сюрпризом! Никто не знает, каким образом распределение вещества — настолько неправильное в плане — ухитряется быть таким идеально плоским. Этот факт должен иметь какое-то глубокое значение для динамики Галактики. Однако на краях имеются интересные систематические отклонения от плоскости. Мы столкнулись с некоторыми трудностями, пытаясь согнуть нашу модель так, чтобы она отображала так называемый эффект «резкого загиба». Средняя поверхность, наблюдаемая по излучению водорода, немного приподнимается вверх в одном месте и опускается вниз на противоположной стороне диска.

К сожалению, нельзя сказать с уверенностью, в какую сторону вращаются спиральные ветви. Вызывает удивление, что этот вопрос не был решен до сих пор. Наивное предположение о том, что из-за сходства с косозубой

шестеренкой спиральные туманности должны вращаться как зубчатое колесо, трудно доказать без убедительной теории эволюции Галактики. Что касается других спиральных туманностей, то допплеровское смещение спектральных линий дает указание, какая сторона приближается к нам, но нет никакого способа найти, какая сторона *ближе* к нам, так что по-прежнему остается мучительная неопределенность. Мне кажется, что большинство склоняется к модели зубчатого колеса. Дальнейшее улучшение водородной карты нашей Галактики, для которой мы можем *знать* знак вращения, может решить вопрос однозначно.

Все это стало известно из одной отрасли радиоастрономии; и прежде чем обратиться ко второй части своего доклада, я хотел бы отметить тот факт, что это нам удалось узнать, принимая удивительно малое количество энергии, дошедшей до нас очень длинным путем. Полная мощность, приходящая к Земле в форме излучения водорода отовсюду из Вселенной, т. е. мощность, падающая на всю поверхность Земли, составляет около 1 *ватта*! Радиоастрономы в Лейдене, Гарварде, Сиднее, в Грин Бэнк и других местах улавливали с помощью своих антенн ничтожную часть этой мощности. Более удивительным является число, которое мне пришлось пересчитать трижды, прежде чем я уверился в своих расчетах: полная *энергия*, принятая *всеми* обсерваториями на волне 21 *см* за последние девять лет, меньше 1 *эрг*! Из менее чем 1 *эрг* энергии мы построили эту картину нашей *Галактики*. Большинство знает, что́ такое 1 *эрг*: с такой энергией нельзя даже стряхнуть пепел с сигареты. Этот факт следует запомнить — он будет основой той теории, которую я попытаюсь разобрать в двух последних частях статьи.

КОСМИЧЕСКИЕ ПЕРЕЛЕТЫ

Во второй части я кратко расскажу о космических путешествиях; хочу подчеркнуть, что я не собираюсь обсуждать вопрос о полетах в солнечной системе (полеты на Луну, Марс и т. д.). Мы рассмотрим более далекие перспективы, как это делается в астронавтике, и будем иметь в виду путешествия *за пределы* солнечной системы.

Об этом написано очень много. Вероятно, всем уже надоело слушать об этом, но я надеюсь, что можно найти некий свежий аспект, если посмотреть на проблему со следующей точки зрения. Разумеется, все находится очень далеко от нас. Звезды очень далеки. Ближайшая звезда, α Центавра, находится на расстоянии 4 световых

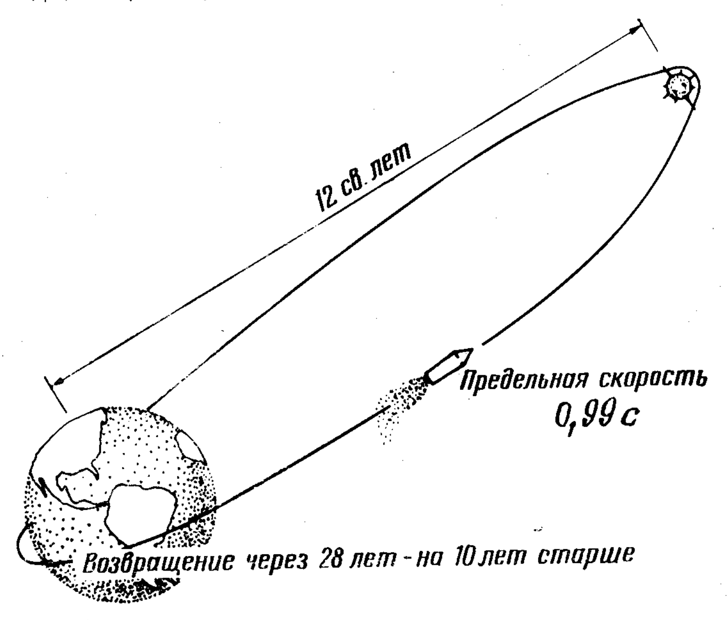


Рис. 11. Полет на расстояние 12 световых лет.

лет. Людей это беспокоит, однако они говорят в утешение: «Ничего страшного, так как мы будем путешествовать почти со скоростью света. Даже без теории относительности мы прилетим туда быстро, а благодаря теории относительности мы прилетим туда, оставаясь молодыми». Пока все это, на мой взгляд, абсолютно правильно. Специальная теория относительности надежна. Трудность заключается не в *кинематике*, а в *энергетике*. Я поясню это на частном примере. Рис. 11 иллюстрирует мой пример. Рассмотрим полет до места, удаленного на 12 световых лет, и обратно. Если мы не хотим, чтобы для полета

потребовалось несколько поколений, примем произвольно, что мы слетаем туда и вернемся обратно за 28 лет земного времени. В середине пути мы достигнем скорости, составляющей 99% скорости света, затем затормозим и вернемся обратно. Релятивистские преобразования показывают, что мы вернемся через 28 лет, постарев только на 10 лет. В это я верю. Свету потребуется 24 года для того, чтобы пройти путь туда и обратно; путешественнику необходимо 28 лет с точки зрения человека, находящегося на Земле, но сам путешественник, вернувшись обратно, постареет лишь на 10 лет. Мне не хочется прерываться и обсуждать здесь «парадокс близнецов», так как если не принимать его следствия, то заключение, к которому я хочу прийти, будет даже *сильнее*. Лично я верю в специальную теорию относительности. Если бы она была ненадежной, то некоторые наши весьма дорогостоящие машины не смогли бы работать.

Давайте теперь рассмотрим вопрос об устройстве ракеты, предназначенной для этого полета. Начнем с эскиза ракеты, приведенного на рис. 12. Это устройство, в котором имеется какое-либо топливо; последнее сжигается и выбрасывается назад. Сила отдачи ускоряет ракету. Когда топливо израсходовано, ракета достигнет своей конечной скорости, и остается только полезная нагрузка. Это *лучшее*, что можно сделать — тащить с собой лишние железки было бы только хуже. Разделение ракет на ступени, т. е. использование четырех или пяти последовательно уменьшающихся ступеней,— это просто попытка *приблизиться* к этому идеалу. Действие ракеты почти целиком зависит от той скорости, с которой истекают продукты сгорания $V_{\text{вых}}$. Специалисты по ракетному делу говорят об удельном импульсе, но импульс этот на самом деле имеет размерность скорости. Рассмотрим ту роль, которую играет эта скорость в движении ракеты (рис. 12). Здесь изображена ракета со своей $V_{\text{вых}}$, и мы хотим разогнать ее до какой-то конечной скорости $V_{\text{макс}}$. В этом случае элементарные законы механики (элементарные законы механики с учетом релятивистских эффектов) неумолимо накладывают определенное соотношение между начальной и конечной массой ракеты в *идеальном* случае. Это соотношение, приведенное на рис. 13, является точ-

ным релятивистским соотношением. Оно получается очень просто из сохранения момента и энергии, соотношения массы и энергии; *больше ничего не требуется*. Другими словами, единственное что может быть неправильным

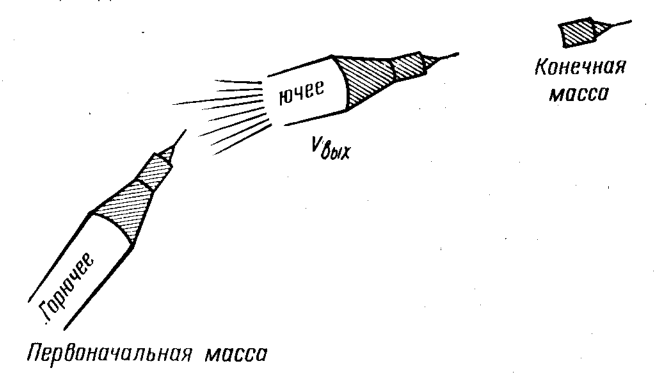


Рис. 12. Схема ракеты.

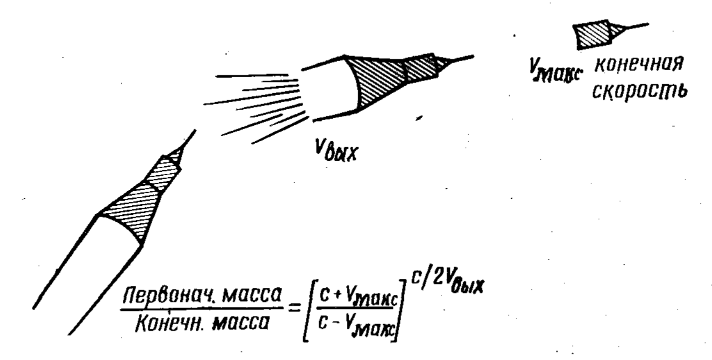


Рис. 13. Соотношение между начальной и конечной массой ракеты в идеальном случае.

в этом уравнении, это то, что я ошибся при его выводе. Это всегда возможно, но я не думаю, что ошибся. Проверка в предельных случаях показывает, что все верно.

Легко видеть недостаток малой скорости выхода. Если мы потребуем, чтобы конечная скорость $V_{макс}$ была близка к скорости света, знаменатель станет очень малым, а показатель степени — очень большим. Это свойство не

является характерным для релятивистской области; оно имеет место и в обычных ракетах в тех случаях, когда требуемая конечная скорость много больше скорости выхода, что, к сожалению, получается в случае спутников Земли, запускаемых при помощи ракет с химическим топливом.

Очевидно, для нашей ракеты мы должны потребовать топливо с *очень большой* скоростью выхода. Отвлекаясь от всех практических вопросов, я предлагаю для первого варианта ракеты использовать топливо *идеального ядерного синтеза*.

При идеальном топливе ядерного синтеза

$$4H \rightarrow He, \quad V_{вых} \approx \frac{1}{8}c.$$

Если $V_{макс}$ должно быть равно $0{,}99\,c$, то

$$\frac{\text{Начальная масса}}{\text{Конечная масса}} = 1{,}6 \cdot 10^9.$$

Я предполагаю превращать водород в гелий со 100-процентной эффективностью; гелий будет выбрасываться неким способом назад с кинетической энергией, эквивалентной (в системе координат, связанных с ракетой) полному изменению массы. С помощью ядерного синтеза нельзя получить большего. Легко найти скорость выхода: она составляет около $^1/_8$ скорости света. Из уравнения на рис. 13 следует, что для достижения скорости $0{,}99\,c$ требуется начальная масса, несколько бо́льшая *миллиарда* конечных масс. Чтобы поднять 1 *т*, мы должны стартовать с миллиардом тонн; нет никакого способа что-либо улучшить, если нет лучшей реакции.

В природе просто *нет* лучших реакций синтеза, за исключением одной. Нам нечего опасаться, так что давайте сделаем последний шаг и обратимся к идеальному топливу — веществу с антивеществом. Вещество и антивещество аннигилируют; получающаяся при этом энергия выходит из нашей ракеты со скоростью *c* или около этого. Это намного улучшает ситуацию. Чтобы достигнуть 99% скорости света, необходимое отношение начальной массы к конечной должно быть равно лишь 14. Однако надо помнить, что этого недостаточно — мы только достигли $V_{макс}$, и наша задача выполнена лишь на одну четверть.

При идеальном топливе вещество + антивещество

$$V_{\text{вых}} \approx c;$$

для $V_{\text{макс}} = 0{,}99\,c$

$$\frac{\text{Начальная масса}}{\text{Конечная масса}} = 14.$$

Но для того, чтобы остановиться, вернуться назад и снова остановиться,

$$\frac{\text{Начальная масса}}{\text{Конечная масса}} = 14^4 = 40\,000.$$

Мы должны затормозить и остановиться, развернуться, снова набрать скорость, вернуться назад и остановиться. Это делает отношение равным не $4 \cdot 14$, а 14^4, что составляет 40 000. Поэтому, для того чтобы взять груз 10 *т* в полет, изображенный на рис. 11, я вижу единственный путь: на старте мы должны иметь 400 000-тонную ракету, наполовину состоящую из вещества и наполовину — из антивещества.

Между прочим, имеется одна трудность, о которой я должен был сказать раньше, но теперь она достаточно тривиальна. Если бы мы двигались со скоростью 99% скорости света через нашу Галактику, которая содержит один атом водорода в кубическом сантиметре даже в «пустых местах», то каждый из этих атомов представлялся бы *нам* как протон с энергией 6 млрд. *эв*, и они двигались бы нам навстречу потоком, приблизительно эквивалентным потоку от 300 брукхэвенских космотронов на квадратный метр. Перед нами возникает дополнительная проблема экранировки, которую надо решить, прежде чем начинать работать над проблемой защиты, связанной с двигателем ракеты. Эта проблема станет поистине пугающей, если посмотреть на рис. 14, где показана наша окончательная конструкция. Мы имеем 200 000 *т* вещества, 200 000 *т* антивещества и 10-тонную полезную нагрузку (расположенную по возможности достаточно далеко).

Необходимое ускорение составляет около 1 *g* на протяжении всего полета, а не только при отрыве от Земли. Оказывается, что ускорение *g* за 1 год дает приблизительно скорость света, так что если мы хотим достичь

скорости света за время порядка года, мы должны иметь дело с ускорениями порядка 1 *g*. (Это один из фактов, в отношении которых релятивистская астронавтика проста.

Не нужно никаких данных космической медицины, чтобы убедиться, что мы можем выдержать 1 *g*. Мы делаем это всю жизнь.) Чтобы достичь нужного ускорения, наша ракета в начале своего пути должна выделять около 10^{18} *вт*. Это несколько больше, чем полная мощность,

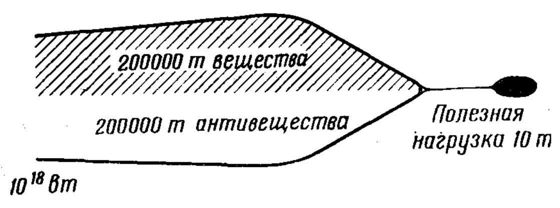


Рис. 14. Схема идеальной ракеты.

получаемая Землей от Солнца. Но это не свет, это γ-лучи. Так что проблема состоит не в защите *кабины*, а в защите *Земли*.

Вы скажете, что это нелепо. Точно так же думаю и я. Это *действительно* бессмысленно. К тому же надо помнить, что мы пришли к таким выводам на основании элементарных законов механики. Все люди, которые серьезно говорят о «жизненном пространстве» в космосе, и тому подобных вещах, просто никогда не пробовали сделать этот расчет.

СВЯЗЬ ЧЕРЕЗ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

Теперь я хочу обратиться к другому вопросу, который также является умозрительным, но имеет дело с величинами совершенно иного масштаба,— к проблеме связи через космическое пространство. Мы уже узнали, как мало энергии было связано с тем количеством информации, которая выявила структуру нашей Галактики. На рис. 15 дан пример передачи сообщений с практической точки зрения. В системе передачи сообщений из одной точки в другую, использующей достаточно большие

антенны в обеих точках, телеграмма в 10 слов может быть передана на указанное выше расстояние 12 световых лет с затратой электроэнергии на 1 доллар. Это возможно потому, что мы можем обнаруживать, усиливать и опознавать в радиосхемах исключительно малые количества энергии, и потому, что энергия распространяется до нас без каких-либо потерь, за исключением уменьшения по закону «обратных квадратов» в процессе распространения.

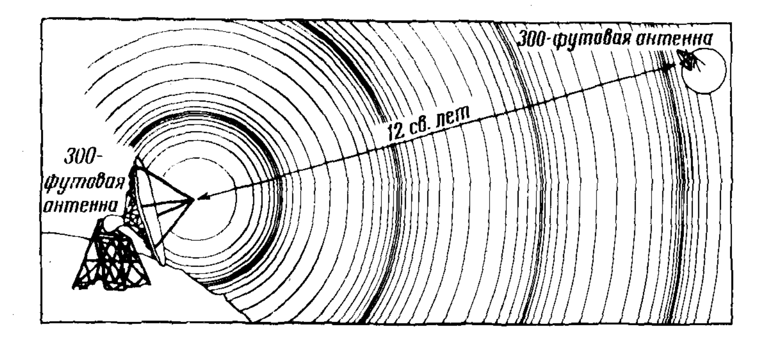


Рис. 15. Чтобы передать телеграмму из 10 слов, мы должны излучить электрической энергии на 1 доллар.

Разумеется, трудность состоит в том, что на другом конце нет никого, с кем можно было бы связаться. Или есть? То, о чем я сейчас собираюсь говорить, не является новым, и, возможно, я не скажу ничего нового, однако я думал об этом достаточно много. Это вопрос о связи с другими людьми, находящимися где-либо (если они там есть).

Давайте снова посмотрим на Галактику. В Галактике содержится около 10^{11} звезд. *Двойные* звезды не являются редкостью; по-видимому, двойных звезд почти столько же, сколько и одиночных. Астрономы считают этот факт указанием на то, что не редкостью могут быть и невидимые спутники в виде планет. Больше того, очень много звезд потеряло свой угловой момент и не вращается. Одним из удобных для звезд способов потерять угловой момент является образование планет; вероятно, именно это произошло в нашей собственной солнечной системе. Поэтому вероятность того, что среди этих сотен миллиардов звезд имеются сотни миллионов планетных систем, кажется достаточно большой. Можно было бы более тщательно подсчитать все это, но я не собираюсь делать попыток оценить вероятность того, что планета будет расположена на подходящем расстоянии от звезды, что у нее есть атмосфера, в которой возможна жизнь, что жизнь уже развилась и так далее. В таких оценках понятие вероятности очень быстро теряет свой функциональный смысл. С другой стороны, нетрудно представить, сколь невероятным было бы то, что только одна планета из миллиарда — имея в виду лишь нашу Галактику — стала бы обителью разумной жизни.

Раз мы с такой легкостью можем установить связь на столь большие расстояния, то, вероятно, легко установить связь с обществом (давайте употреблять этот термин), находящимся где-либо далеко. Начать связь было бы легче для них, если бы они превзошли нас. Должны ли мы попытаться услышать призывы или нам нужно передавать какое-либо сообщение в надежде, что кто-нибудь его услышит? Если подумать немного, то я уверен, что вы согласитесь, что мы хотели бы послушать, *прежде* чем передавать. Шкала времени Галактики чрезвычайно велика. Беспроволочному телеграфу всего 50 лет, а чувствительным приемникам еще меньше. Если искать людей, которые могут принимать наши сигналы, но не превзошли нас в технологическом отношении, т. е. людей, которые отстали от нас не более чем на 20 лет, то этим самым мы будем затрагивать лишь очень тонкий пласт истории. С другой стороны, слушая, мы ищем людей, которые находятся *где-то* впереди нас, если, конечно, у них есть необходимость посылать сигналы. Кроме того, в силу своего технологического развития они могут передавать намного лучше нас. (По ряду фундаментальных причин в этой игре передавать труднее, чем принимать.)

Так что передавать прежде, чем слушать, было бы неразумно. Игра эта очень занимательна. Я не буду много говорить о ней, так как вы получите больше удовольствия, занимаясь ею сами; позвольте только пояснить ее смысл. Во-первых, это в сущности криптография наоборот. Разрешите предположить (это, может быть,

неверно, но давайте предположим), что где-то существует кто-то, опередивший нас в технологическом развитии. Он может передавать мощности 10 *Мвт* столь же легко, как мы 1 *квт*, и он хочет, чтобы мы приняли его сигнал. Несомненно, что он знает о нас больше, чем мы о нем, и, более того, он является нашим сравнительно близким соседом в Галактике. Нас окружает одна и та же среда; он знает все о линии водорода — он узнал о ней сотни лет назад. Он знает, что эта линия является единственной заметной линией в «окне прозрачности».

Если вы хотите кому-либо передать что-то и не можете договориться о частоте, дело почти безнадежно. Искать во всем радиоспектре слабый сигнал — значит тратить огромное (и поддающееся расчету) количество времени. Это все равно, что пытаться встретиться с нужным вам человеком в Нью-Йорке, не договорившись о месте встречи. И все же вы знаете, что вам нужно встретиться с ним и он также хочет увидеть вас. Где же вы в конце концов остановитесь? Есть только два или три места: например, Главный почтамт и т. д. В нашем случае есть только один Главный почтамт, а именно линия 1420 *Мгц*, которая по интенсивности по крайней мере в 1000 раз, а может быть и больше, выделяется из других радиочастот во всей Галактике. Поэтому не может быть вопроса, где передавать: если вы хотите, чтобы другой услышал, вы выбираете частоту, которую он знает. И наоборот, он выберет частоту, которую он считает известной нам; это та частота, на которой следует слушать. Если внимательно заниматься этой игрой, можно найти неизбежное решение. Мы знаем что делать, мы знаем где слушать. Мы не знаем точно, каков будет его код, но мы знаем, как составить программу вычислительной машины для изучения различных кодов. Давайте сделаем некоторые разумные предположения, например о мощности. Пусть передатчик может излучать 1 *Мвт* в полосе частот 1 *гц*. Примерно это мы могли бы сделать в следующем году, если понадобится; это представило бы небольшое усилие для современного уровня техники. Возможно, мои сведения устарели, уже сейчас могут быть контракты на выполнение таких работ. Предположим, что мы принимаем на 100-метровую пароболическую антенну и он передает с такой же антенной. Предельное расстояние зависит от того, как мы будем обрабатывать сигнал; однако при очень простых и умеренных предположениях относительно этой проблемы я нашел, что мы сможем поймать его сигнал, даже если он приходит с расстояния нескольких сотен световых лет. С помощью новых приемников-мазеров, которые только что начали применяться в радиоастрономии, легко достичь расстояния 500 световых лет. В сфере радиусом всего 100 световых лет содержится около 400 звезд приблизительно одинаковой (±1 звездная величина) с Солнцем яркости. Но следует иметь в виду, что объем, доступный для связи, растет, как куб расстояния. Я доказал, что путешествовать на расстояние даже в несколько световых лет исключительно трудно; в то же время на редкость легко связываться на расстояниях в несколько сотен световых лет.

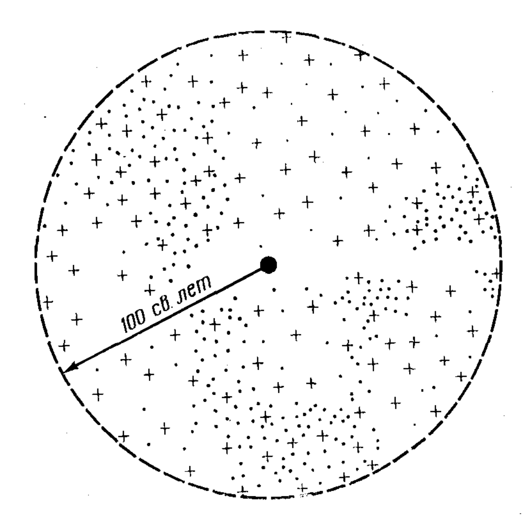


Рис. 16. С трудом доступно с помощью полета: 1 кубический световой год, ничего не содержащий, кроме солнечной системы (черный кружок). Легко достигается путем радиосвязи: 3 миллиона кубических световых лет, содержащих 500 звезд, подобных Солнцу.

Я думаю, что в действительности эти числа недооценивают разницу. Но даже в этом случае отношение объемов равно 1 миллиону (рис. 16).

Имеются и другие интересные вопросы. Когда мы принимаем сигнал, как убедиться в том, что это реальный сигнал, а не какое-то случайное нарушение космического равновесия? Я называю этот вопрос «проблемой топора».

Археолог находит кусок камня, который смутно напоминает топор, приблизительно в правильном слое почвы. Как он узнáет, что это топор, а не кусок камня причудливой формы? На самом деле обычно они *очень* уверены. Наконечник стрелы может быть похож на гальку эллиптической формы, и все же, несомненно, это наконечник стрелы.

Наша «проблема топора» может быть решена многими способами. Самое изящное из известных мне предложений принадлежит Коккони и Моррисону [2], которые опубликовали дискуссию по всей этой проблеме. Моррисон считает, что надо передавать несколько первых простых чисел. Все что нужно — это 1, 3, 5, 7, 11, 13, 17, . . ., вы их сразу *узнáете*. Никакие естественные процессы, например магнитные бури на Венере, не могли бы образовать последовательность простых чисел.

О чем можно говорить с нашими далекими друзьями? У нас много общего. У нас общая математика, физика и астрономия. Существует Галактика, в которой мы являемся близкими соседями. Млечный Путь выглядит для них почти так же — на нашей модели 400 световых лет соответствуют всего 3 *мм*. У нас общая химия, вернее неорганическая химия. Еще неизвестно, развивалась ли их органическая химия по тому же пути, что и наша. Так что мы можем начать наш разговор на общей почве, прежде чем двинуться в волнующее исследование того, что не будет общим. Конечно, этому обмену, этому разговору присуща одна характерная особенность — неизбежная задержка. Вы получаете ответ через десятилетия. Но вы уверены в том, что получите его. Это общение глубоко миролюбиво. Никто не угрожает другому предметами. Мы уже видели, *чего* стоит посылать предметы, но можно посылать информацию практически бескорыстно.

Здесь мы имеем идеал философской беседы: все, что можно делать — это обмениваться идеями.

Я не уверен, что мы уже должны заняться этим. Я не призываю тратить деньги на оборудование пунктов приема, хотя фактически уже идет программа прослушивания очень скромного масштаба в Грин Бэнк под руководством Дрейка, который имеет несколько очень остроумных и, я думаю, твердых идей относительно того, как это делать. Но до сих пор там ничего не услышали.

На мой взгляд, эта деятельность еще слишком преждевременна для того, чтобы наше общество занималось ею в большом масштабе. Мы не доросли до нее. Это проект, который должен быть проектом *века*, а не какого-то финансового года. Однако я считаю, что задумываться об этом не слишком рано и выглядит это не более детским занятием, чем размышления о межзвездных полетах астронавтов. На мой взгляд, большинство таких проектов полета астронавтов бессмысленны. А возражения, что мы должны *побывать* на планетах далеких звезд, кажутся мне детскими. Допустим, вы взяли ребенка с собой в музей искусств, и он захотел потрогать картины; тогда вы ему скажете: «Этого делать нельзя, надо стоять и смотреть на картины и пытаться их понять. Так мы можем узнать о них больше». Все эти проекты путешествий по Вселенной в скафандрах — за исключением *местного* исследования, которое я сейчас не рассматриваю,— стоит выбросить в мусорную корзину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Du Bridge A., Introduction to Space, N. Y., 1960.
2. Cocconi G., Morrison P., Nature, 184, 844 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 177—182.)

14 ОСУЩЕСТВИМЫ ЛИ КОСМИЧЕСКИЕ ПОЛЕТЫ?

Задача настоящей статьи — выяснить, станут ли для нас межзвездные путешествия возможными в далеком будущем и возможны ли они тем самым для других более развитых цивилизаций уже в настоящее время? Есть ли какая-то надежда на установление непосредственного контакта или же все контакты между цивилизациями сведутся к передаче одних только электромагнитных сигналов? Конечно, на основе современных оценок мы не сможем дать окончательного ответа типа да — нет, но мы можем отметить основные факты и приблизиться к ответу, насколько это возможно в настоящее время, предоставив читателю самому сделать окончательный вывод.

Начнем с обзора современных ограничений и проблем космического полета, обращая основное внимание на несколько главных моментов и разделяя принципиальные трудности и временные. Основываясь на этих исходных моментах, мы попытаемся затем оценить возможности космических полетов в будущем.

В этих прогнозах предполагается значительно более высокоразвитая техника, чем мы имеем в настоящее время. Таким образом, мы отвлекаемся от всех технических проблем, насколько сложны бы они ни были. Рассматриваются лишь такие фундаментальные характеристики, как время, ускорение, мощность, масса и энергия.

Результаты даются в виде минимальных длительностей полета при различных допущениях. Далее приводятся

расчеты, подтверждающие некоторые основные требования для достижения этих длительностей полета.

ЭНЕРГИЯ ХИМИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

В настоящее время используется единственный механизм ускорения — сжигание вещества, причем относительно низкая энергия связи между атомами устанавливает два ограничения: в энергетическом выходе горючего и в жаропрочности материала камеры сгорания и сопла.

Чтобы преодолеть земное притяжение и запустить в космос 1 *кг* вещества, необходима энергия в 17,4 *квт-час*. Но лучшее горючее — смесь водорода с кислородом — дает лишь 3,2 *квт-час* с 1 *кг* топлива (взрывчатые вещества дают еще меньше, например тринитротолуол — 1,1 *квт-час*/*кг*). Следовательно, для запуска полезного груза массой в 1 *кг* требуется 5,4 *кг* горючего, но сам запас топлива тоже должен быть ускорен, поэтому это требует еще больше горючего и т. д. Несмотря на эту трудность, малые ракеты все же можно запускать, но с чрезвычайно низкой эффективностью.

Наличие более теплотворного топлива не спасло бы положения. Никакой материал сопла обычно не выдерживает температуры выше 4000° С. Если газообразные продукты сгорания с такой температурой выбрасываются через сопло, то скорость их составляет около 4,0 *км*/*сек*, если это водяной пар, и меньше, если сгорает вместо водорода другое горючее. Но для преодоления земного притяжения ракета должна иметь скорость 11,2 *км*/*сек*, а для преодоления межзвездных расстояний за разумные промежутки времени — еще более высокую.

Конечная скорость ракеты V после сгорания всего запаса топлива, скорость выхода S, создаваемая двигателем, и так называемое массовое отношение $\mathfrak{M} = M_i/M_0$ связаны хорошо известной формулой

$$\frac{V}{S} = \ln \mathfrak{M}, \quad (1)$$

где M_i — полная начальная масса ракеты (включая топливо), а M_0 — масса после сгорания топлива, т. е. M_i минус масса топлива. Логарифм очень медленно увели-

чивается с ростом аргумента; даже если горючее составляет 90% первоначальной массы, то скорость ракеты будет лишь в 2,3 раза больше скорости выхода. И даже если бы можно было построить ракету, 99,9% начальной массы которой составляет топливо, то и тогда конечная скорость была бы только $V \approx 6{,}9\ S$. В настоящее время невозможно построить такую ракету, но мы можем ее имитировать при помощи многоступенчатой ракеты. Однако и при этом сохраняется та же трудность, так как массовые отношения всех ступеней перемножаются (легкий снаряд в последней ступени, тяжелый — в первой), а скорости ступеней складываются. Таким образом, в случае ракет с двигателями, работающими на химическом топливе, даже многоступенчатых, мы уже в состоянии покинуть Землю, но не можем достигнуть больших скоростей.

Чтобы выразить это точнее, определим эффективность ракеты Q как отношение полезной энергии (кинетической энергии движения пустой ракеты) к энергетическому содержанию всего сожженного топлива. Тогда получим

$$Q = \frac{\left(\frac{V}{S}\right)^2}{e^{V/S} - 1}. \qquad (2)$$

Эффективность имеет максимальное значение $Q = 0{,}647$ при $V/S = 1{,}59$, но падает она очень быстро и равна 1% при $V/S = 9$, а в случае многих ступеней она еще значительно меньше. Эффективность идеальной многоступенчатой ракеты составляет 0,1% для $V/S = 6$.

Эти трудности, связанные с низкой энергией связи, являются временными, так как они относятся только к сгорающему топливу. В увеличении энергетической эфективности топлива крупным шагом вперед был бы переход к использованию атомной энергии; например, расщепление урана дает 20 млн. *квт-час/кг*. Можно избежать применения сопла, а также высоких температур, если научиться использовать как движитель поток ионов (заряженные частицы — ионы — ускоряются электрическим полем до высокой скорости, с которой они покидают ракету). Например, ускорение напряжением в 5000 *в* могло бы создать S порядка 100 *км/сек*. В этом случае S пропорционально корню квадратному из ускоряющего напряжения. Рассмотрение этих трудностей приводит к следующему фундаментальному принципу: для того чтобы избежать чрезмерно низкой эффективности, скорость выхода S следует сделать того же порядка величину, что и конечная скорость ракеты V.

$$S \approx V. \qquad (3)$$

ОТНОШЕНИЕ МОЩНОСТЬ/МАССА

Как только эти две трудности будут преодолены благодаря высокой энергетической эффективности топлива и высокой скорости выхода, немедленно возникает новая фундаментальная проблема.

Ускорение ракеты b определяется очевидным образом:

$$b = \frac{\text{Сила тяги двигателя}}{\text{Масса ракеты}}. \qquad (4)$$

Далее, сила тяги равняется выбрасываемому потоку массы (*масса/сек*), умноженному на скорость выхода S; необходимая мощность равна половине произведения потока массы на квадрат скорости выбрасывания. Поэтому вместо (4) можно написать

$$b = \frac{2P}{S}, \qquad (5)$$

где P — отношение мощности двигателя к полной массе ракеты.

Это означает, что при большой скорости выхода S требуется высокое отношение P мощности к массе, в противном случае ускорение b будет мало.

Однако ядерные реакторы, а также оборудование, необходимое для создания сильной ионной тяги, настолько сложны и массивны по сравнению с относительно простыми двигателями, работающими на обычном химическом топливе, что было бы преждевременным надеяться на достижение в настоящее время при помощи реакторов тех значений P, которые уже реализованы на двигателях с химическим топливом. Таким образом, ускорение будет чрезвычайно мало до тех пор, пока не будет найден путь к увеличению отношения мощность/масса для реактора на много порядков величины.

ДАЛЬНОСТЬ МЕЖЗВЕЗДНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Единственной задачей, достаточно важной для того, чтобы оправдать огромные усилия, необходимые для совершения межзвездных путешествий, представляется поиск других разумных существ. В недавней работе [1] мы пытались оценить расстояния между соседними, в техническом отношении развитыми цивилизациями, чтобы стимулировать подготовку и поиск возможных электромагнитных сигналов. Основные интересующие нас здесь моменты можно сформулировать следующим образом:

1. Было бы манией величия думать, что мы являемся единственной разумной цивилизацией во Вселенной. Напротив, на основе наших современных знаний следует принять, что жизнь и разум развивались приблизительно с той же скоростью, что и на Земле, где-нибудь «в окрестностях», и что для этого имелось достаточно времени. Из наших современных ограниченных данных можно сделать заключение, что это было бы возможно на планетах приблизительно 6% звезд. Ближайшие десять таких звезд находятся от нас на среднем расстоянии 5,6 *парсек* (1 *парсек* $= 3{,}09 \cdot 10^{13}$ *км* $= 3{,}26$ светового года).

2. Столь же необоснованным было бы утверждение, что современное состояние нашего разума является вершиной эволюции живой материи. Напротив, следует допустить, что наука и техника являются одним звеном в длинной цепочке и когда-нибудь им на смену придут совершенно новые и непредвиденные интересы и виды деятельности (точно так же как богов и демонов сменила наука, предложив объяснения многих важных явлений). Предположим, что долговечность L пребывания цивилизации на высшей стадии технического развития конечна; если обозначить возраст самых старых звезд через T, а среднее расстояние до ближайших десяти высокоразвитых цивилизаций — через D, то

$$D = 5{,}6 \text{ парсек} \left(\frac{T}{L}\right)^{1/3}. \qquad (6)$$

Для T можно принять значение 10 млрд. лет, но величину L оценить чрезвычайно трудно. Наше личное мнение состоит в том, что следует принять для L несколько десятков тысяч лет, но так как многие исследователи считают это пессимистической оценкой, возьмем для нашей цели значение 100 000 лет, что приводит к значению в 250 *парсек* для D. К счастью, D слабо зависит от неточности L, и даже при изменении L в 8 раз D изменяется лишь в 2 раза.

В связи с межзвездным космическим полетом мы должны четко выделять два вопроса:

а) Какие существуют возможности для *наших* будущих космических полетов? При этом речь идет о *любой* форме разумной жизни, и расстояние, которое мы должны преодолеть, составит

$$5{,}6 \text{ парсек } (= 18{,}6 \text{ светового года}). \qquad (7)$$

б) Исследование возможности посещения нас другими существами. В этом случае другая цивилизация должна быть *технически развитой*, и в последующих вычислениях для упомянутого выше расстояния, которое должны покрыть эти существа, используется значение

$$250 \text{ парсек } (= 820 \text{ световых лет}). \qquad (8)$$

Для иллюстрации этих астрономических расстояний воспользуемся моделью в масштабе 1 : 180 млрд. Тогда Земля изображается мелкой песчинкой, едва видимой невооруженным глазом, которая вращается вокруг Солнца — вишневой косточки — на расстоянии немного меньше 1 *м*. В пределах нескольких метров лежит расстояние предстоящих скоро полетов на другие планеты солнечной системы, например на Марс и Венеру. Но ближайшая звезда, Проксима Центавра, представляет собой другую вишневую косточку, удаленную на 220 *км*, а более удаленные звезды с обитаемыми планетами, где можно искать разумную жизнь, находятся на расстоянии 980 *км*. Расстояния до еще более далеких развитых цивилизаций равны в этой модели длине окружности Земли. В качестве курьеза можно представить также расстояние до туманности Андромеды, ближайшей к нашей Галактике звездной системы: в нашем масштабе она удалена на расстояние, равное расстоянию между Землей и Солнцем. Самые далекие из наблюдаемых галактик находятся в 2000 раз дальше, и здесь уже наша модель не способствует наглядности представлений.

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ СЛУЧАЙ

Одно представляется сейчас очевидным: чтобы преодолевать *межзвездные расстояния за приемлемые промежутки* времени, необходимо лететь со скоростью, как можно более близкой к скорости света — верхнему пределу любой скорости согласно теории относительности (и в согласии со всеми экспериментами с частицами высоких энергий). Но когда мы приближаемся к скорости света, обычные формулы физики нужно заменить формулами теории относительности.

Это может несколько облегчить положение, так как одно из наиболее захватывающих утверждений теории относительности состоит в том, что время не имеет абсолютного характера, а сокращается в системах отсчета, скорость которых приближается к скорости света. Если, например, необходимо покрыть расстояние в 800 световых лет и вернуться обратно, то оставшиеся на Земле должны будут *ожидать возвращения ракеты по меньшей мере* 1600 лет. Но если скорость ракеты близка к световой, то ход времени для этой ракеты и ее экипажа отличается от земного и можно ожидать, что члены экипажа проведут в пути лишь несколько лет.

Дальнейшие уравнения выведены в предположении, что формулы специальной теории относительности справедливы и при наличии постоянного ускорения и замедления — допущение, до сих пор недоказанное. Мы сократим по возможности эту часть рассуждений, и избегающий формул читатель может сразу перейти к следующему разделу нашей статьи.

Используются следующие обозначения: τ — время в системе ракеты; t — земное время (оба равны нулю в момент старта ракеты); v — скорость ракеты (измеренная с Земли); c — скорость света; b — ускорение ракеты (измеренное *внутри* ракеты по давлению единичной массы на пружину), предполагаемое постоянным; x — расстояние между ракетой и Землей.

Дифференциалы τ и t связаны следующим образом:

$$d\tau = dt\left[1-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{1/2}, \qquad (9)$$

и дифференциальное уравнение для v

$$\frac{d}{dt}\left\{\frac{v}{[1-(v/c)^2]^{1/2}}\right\} = b \qquad (10)$$

легко интегрируется. Решая относительно v, получаем

$$v(t) = \frac{bt}{[1+(bt/c)^2]^{1/2}}. \qquad (11)$$

Используя (11), можем проинтегрировать (9):

$$\tau(t) = \int_0^t \left[1-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]^{1/2} dt = \frac{c}{b}\arcsin\frac{bt}{c}, \qquad (12)$$

в то время как интегрирование для расстояния дает

$$x(t) = \int_0^t v\,dt = \frac{c^2}{b}\left\{\left[1+\left(\frac{bt}{c}\right)^2\right]^{1/2} - 1\right\}. \qquad (13)$$

Понятно, что для того, чтобы иметь эквивалент нашей формулы (1), тяга и ускорение, измеренные внутри ракеты, должны быть связаны как обычно:

$$-\frac{dM}{d\tau}S = Mb, \qquad (14)$$

где M — полная масса ракеты в какой-то момент, $-dM/d\tau$ — поток выбрасываемой массы. Но чтобы достичь $v \approx c$, необходимо иметь также $S \approx c$ согласно (3), и S в (14) следует заменить на $S\,(1 - S^2/c^2)^{-1/2}$. Далее, $S \approx c$ требует настолько много энергии, что при интегрировании (14) следует рассматривать также потерю массы вследствие дефекта масс. Нижеследующие расчеты показывают, что даже в случае использования атомной энергии S и v будут все же значительно меньше c, так что релятивистская трактовка не является необходимой и можно применять уравнение (1).

Единственным способом достижения $v \approx c$ оказывается полная аннигиляция вещества. В этом случае используется пучок фотонов и (14) следует переписать в виде

$$-\frac{dM}{d\tau}c = Mb. \qquad (15)$$

Последующие формулы выводятся для случая фотонной ракеты (отбрасывая все сомнения относительно прак-

тического использования эффекта). Проинтегрируем (15) от старта ($M = M_i$) до полного выгорания топлива ($M = M_0$). Продолжительность этого периода ускорения для экипажа корабля τ_0 и для людей на Земле t_0 из (12) равна

$$\tau_0 = \frac{c}{b} \ln \mathfrak{M} \tag{16а}$$

и

$$t_0 = \frac{2c}{b} (\mathfrak{M} - \mathfrak{M}^{-1}), \tag{16б}$$

где по-прежнему $\mathfrak{M} = M_i/M_0$, а расстояние, проходимое от старта до выгорания вещества,

$$x_0 = \frac{c^2}{2b} (\mathfrak{M} + \mathfrak{M}^{-1} - 2). \tag{17}$$

После того как рабочее вещество израсходовано, скорость ракеты запишется в виде

$$V = c \frac{1 - \mathfrak{M}^{-2}}{1 + \mathfrak{M}^{-2}}\ ; \tag{18}$$

здесь V — скорость, которая вызывает сокращение времени на последующей (без ускорения) части траектории в отношении

$$\left(\frac{dt}{d\tau}\right)_0 = \frac{\mathfrak{M} + \mathfrak{M}^{-1}}{2}\ . \tag{19}$$

Отметим, что конечная скорость и сокращение времени не зависят от b или t_0; не играет роли и скорость расходования вещества.

Отношение масс должно быть, разумеется, как можно более высоким, и при $\mathfrak{M} \gg 1$ основные уравнения приводятся к виду [1])

$$t_0 \approx 2 \frac{c}{b} \mathfrak{M}, \tag{20а}$$

$$x_0 \approx \frac{c^2}{2b} (\mathfrak{M} - 2), \tag{20б}$$

[1]) Другой вывод уравнения (20), связывающего V и M, был дан Пирсом [2]; там же приведено хорошее объяснение так называемого «парадокса часов». Пирс также рассмотрел возможность использования в качестве топлива межзвездного вещества и пришел к таким же отрицательным результатам, как и изложенные в статье.

$$V \approx c \left(1 - \frac{2}{\mathfrak{M}^2}\right), \tag{20в}$$

$$\left(\frac{dt}{d\tau}\right)_0 \approx \frac{1}{2} \mathfrak{M}. \tag{20г}$$

Наконец, выражение (5) тоже несколько видоизменяется; в случае потока фотонов оно примет вид

$$b = \frac{P}{c}\ . \tag{21}$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Убедившись в том, что энергия, приходящаяся на единицу массы горючего, является одним из важных факторов в космическом полете, рассмотрим теперь наиболее эффективное ядерное топливо. Верхний предел выхода энергии устанавливается одним из фундаментальных законов теории относительности:

$$E = mc^2, \tag{22}$$

который определяет количество энергии E, выделяющееся при полной аннигиляции вещества с массой m. Другими словами, энергия E имеет инерциальную массу (препятствующую ускорению) $m = E/c^2$. Если обозначить через ε удельное содержание энергии (энергия/масса), то при полной аннигиляции $\varepsilon = 9 \cdot 10^{20}$ *эрг/г*.

Полная аннигиляция произойдет лишь в том случае, если соединить вещество и антивещество: протон соединяется с антипротоном, электрон с позитроном и т. д. Но мир, в котором мы живем, состоит только из вещества, и кажется невероятным создать большое количество антивещества при помощи оборудования, построенного из вещества. Следовательно, мы должны искать какой-то иной источник энергии.

Если не говорить об аннигиляции, то, согласно другому фундаментальному закону физики, полное число тяжелых элементарных частиц (протоны + нейтроны) должно оставаться постоянным, и единственное, что еще можно с ними делать,— это соединять несколько легких ядер в одно тяжелое (синтез) или разбивать тяжелые ядра на несколько легких (расщепление) при сохранении суммы

числа протонов и нейтронов. При этом мы можем либо получать, либо затрачивать энергию вследствие различной энергии связи в ядрах разных элементов. Полный выход энергии (протон или нейтрон) в случае аннигиляции составляет 931,13 *Мэв/нуклон* для водорода; он быстро уменьшается до 924,88 для гелия и затем имеет плоский минимум 922,55 *Мэв/нуклон* для железа. Затем энергия на нуклон снова растет, но очень медленно, до 922,65 *Мэв/нуклон* для урана. Разности этих чисел представляют порции энергии, участвующие в ядерных реакциях; наибольший выход энергии получается, если остановить цепь реакций (безразлично, в каком направлении они идут) вблизи железа. Поскольку водород имеет наибольшую энергетическую эффективность, реакции его превращения в гелий могут дать больше энергии; далее, поскольку минимум является вблизи железа очень пологим, то не обязательно останавливать реакцию именно на железе.

В настоящее время расщепление используется в реакторах; продукты расщепления представляют собой смесь элементов разных масс, и выход энергии составляет около половины величины, которая была бы получена при полном переходе всех ядер в ядра железа. Превращение водорода в гелий является источником энергии Солнца и большинства других звезд; он используется только в водородных бомбах. Ученые многих стран напряженно работают над проблемой контролируемого ядерного синтеза, но пока что без значительных успехов.

В настоящее время для космических полетов используется пока только горючее, которое освобождает энергию благодаря химическим реакциям, причем сгорание водорода с образованием воды дает энергетический выход $1{,}15 \cdot 10^{11}$ *эрг/г*. Если вместо этого научиться применять урановые реакторы, то выход энергии на единицу массы увеличится в 5,6 млн. раз. Если когда-либо в будущем станет возможным использовать в качестве источника энергии реакцию синтеза гелия из водорода, то выигрыш в выходе энергии увеличится еще в 10 раз; если же будет осуществлена практически аннигиляция вещества, то энергетический выход вырастет еще в 140 раз. Эти данные собраны в табл. 1.

Таблица 1

Энергетическая эффективность ядерного горючего

Топливо	Конечный продукт	Энергия/масса, 10^{18} *эрг/г*
	Аннигиляция	
Вещество + антивещество	Излучение	900
	Синтез	
Водород	Гелий	6,3
Водород	Железо	8,3
	Расщепление	
Уран	Отходы, как в обычных реакторах	0,65
Уран	Железо	1,1

УСКОРЕНИЕ И ВРЕМЯ

Итак, продолжим оценку основных ограничений будущих космических полетов, пользуясь релятивистскими формулами и предполагая использование ядерного горючего.

Прежде всего мы пренебрегаем требованиями к энергии и мощности. Тогда единственным остающимся ограничением будет максимальное ускорение, которое способен выдержать экипаж корабля. Согласно [3], земной экипаж может выдержать в течение нескольких *лет* ускорение $b = 1g$. Вероятно, в течение длительного полета любой экипаж сможет выдержать лишь ускорение, к которому его члены привыкли на родной планете. Это значение может отличаться в нашем случае на множитель около 2—3 в любую сторону, но все-таки оно, по-видимому, меньше $3g$, если строго рассматривать условия развития жизни. В дальнейших рассуждениях мы будем придерживаться предела $1g$.

Если ускорение ограничено этим фиксированным значением, то минимальное время полета на данное расстояние реализуется в случае, когда половину пути происходит ускорение величиной $1g$ и половину — замедление

с повторением в том же порядке при обратном полете. В табл. 2 содержатся результаты расчетов на основе этого предположения и формул (11) и (13).

Таблица 2

Полная продолжительность и дальность полета (туда и обратно), достигаемые при постоянном ускорении и замедлении в 1 *g*

Продолжительность полета, годы		Достигаемые расстояния, *парсеки*
для ракеты	для Земли	
1	1,0	0,018
2	2,1	0,075
5	6,5	0,52
10	24	3,0
15	80	11,4
20	270	42
25	910	140
30	3 100	480
40	36 000	5 400
50	420 000	64 000
60	5 000 000	760 000

Из табл. 2 видно, что релятивистское сокращение времени дает для экипажа эффективный выигрыш только тогда, когда корабль проведет в путешествии более примерно 10 лет. Однако дальнейшее сокращение происходит очень быстро (экспоненциально), и если члены экипажа проведут в полете 30 лет жизни, то они успеют долететь до туманности Ориона и обратно, причем на Земле за это время пройдет 3000 лет. Для наших характерных расстояний 5,6 и 250 *парсек* времена полета приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Полная продолжительность (в системах ракеты и Земли) полета на расстояния 5,6 и 250 *парсек* (туда и обратно) при постоянном ускорении и замедлении в 1 *g*

Достигаемое расстояние, *парсеки*	Продолжительность полета, годы	
	для ракеты	для Земли
5,6	12,3	42
250	27,3	1550

Многие читатели уже, возможно, потеряли надежду на межзвездные космические полеты в будущем; другие все-таки более оптимистичны. Но до сих пор мы не рассматривали требований к энергии и мощности.

ЭНЕРГИЯ И ВРЕМЯ

Ускорение и замедление ракеты требуют много энергии. Вообще можно представить такую возможность: ракета снабжается воронкой для того, чтобы захватывать межзвездное вещество, которое затем используется как «горючее». Но межзвездная среда обладает очень низкой плотностью (около 10^{-24} *г/см*^{3}), и чтобы собрать 1000 *т* вещества (в 10 раз больше, чем запас горючего ракеты «Атлас») при полете на расстояние 5,6 *парсек*, требуется воронка диаметром 100 *км*; мы исключаем эту возможность. Невозможно пополнять свой запас горючего этим или каким-либо другим способом, двигаясь с высокой скоростью, и, следовательно, ракета должна быть с самого начала обеспечена таким количеством энергии, которое необходимо для достижения цели полета. Пополнение запаса горючего возможно в месте назначения, когда ракета будет покоиться. Для расчета воспользуемся примером трехступенчатой ракеты. Ступени I и II используются для полета к месту назначения — там ступень II пополняется топливом и ступени II и III возвращаются. Таким образом, в течение каждого периода ускорения и замедления работает одна ступень.

Далее следует рассмотреть отношение масс $\mathfrak{M}$ одной ступени. Современные значения $\mathfrak{M}$ составляют около 10, но при использовании более эффективных источников энергии значения $\mathfrak{M}$ стали бы очень малы. Имея в виду чрезвычайную сложность и большие размеры оборудования, необходимого для практического применения ядерных реакций, а также для создания, например, ионных ракет, мы считаем, что значением $\mathfrak{M} = 10$ можно было

бы пользоваться как верхним пределом даже при более развитой технике.

Единственный представляющийся реальным источник ядерной энергии — это расщепление тяжелых ядер, например урана, где 1 *г* дает $6{,}5 \cdot 10^{17}$ *эрг*. Наибольшая эффективность достигается, когда энергия связи самих продуктов распада переводится в кинетическую энергию (хотя в настоящее время неизвестно, как эту операцию можно практически осуществить). В этом случае получим скорость выхода $S = 13\,000$ *км/сек* $= c/23$ — величина, которая настолько меньше скорости света, что можно еще пользоваться уравнением (1). При отношении масс, равном в пределе 10, конечная скорость, после того как израсходовано горючее, будет $V = 30\,000$ *км/сек* $= c/10$. Релятивистские эффекты, например сокращение времени, не будут играть сколько-нибудь существенной роли. Чтобы достичь больших расстояний, мы должны будем лететь бо́льшую часть времени без ускорения (после израсходования горючего ступени I использовать для торможения двигатель ступени II перед самым прибытием в пункт назначения). Полное время полета на расстояние 5,6 *парсек* равно 380 лет, а на 250 *парсек* — 17 000 лет. Разумеется, это не выглядит многообещающим. Если с достаточным оптимизмом считать, что возможно будет использовать для движения ракеты превращение водорода в гелий при массовом отношении 10, то даже тогда можно достичь лишь $V = c/5$ и выигрыш во времени будет опять незначителен. Полное время полета составляет 180 лет для расстояния 5,6 *парсек* и 8000 лет для 250 *парсек* — незначительно больше, чем было получено раньше.

Верхний предел, который нельзя обойти, определяется массовым эквивалентом самой затрачиваемой энергии (ее сопротивление ускорению) независимо от того, как эта энергия получается. Лично я не считаю, что полная аннигиляция вещества или какие-либо другие способы получения «чистой энергии» когда-нибудь будут иметь практическое значение, кроме создания ракет с отношением масс 10. Но допустим, что это достигнуто; тогда можно обеспечить скорость, равную 98% скорости света согласно уравнению (20 в), и в результате сокращения времени для экипажа время будет идти в 5 раз медленнее (после израсходования горючего), чем на Земле. Полет на расстояние 5,6 *парсек* в системе ракеты займет 14 лет, а в системе Земли — 42 года, в то время как для расстояния 250 *парсек* те же величины составляют 300 и 1500 лет. Мы должны провести в ракете 14 лет для того, чтобы обнаружить разумные существа, и лишь после пребывания в ракете в течение 300 лет появится существенная вероятность встречи с цивилизацией, подобной земной, которая находится на таком же уровне развития науки и техники и способна осуществлять столь же длительные полеты.

Следует вновь отметить, что конечная скорость после выгорания топлива не зависит от величины ускорения b как в классическом (1), так и в релятивистском приближениях (18). Скорость расхода горючего не играет роли, важно лишь его энергетическое содержание и масса ракеты. Скорость расхода топлива, разумеется, влияет на длительность периода ускорения, но не на величину конечной скорости. Это значит, что если бы удалось подготовить членов экипажа к перенесению очень больших ускорений (например, замораживание их в блоке льда и т. п.), то можно было бы сократить периоды ускорения, но не длительность полета без ускорения между ними.

В случае расщепления или синтеза ядерного горючего почти весь полет проходит с постоянной скоростью после исчерпания очередной порции горючего, и большое ускорение здесь вообще не поможет. Однако при аннигиляции экипаж проводит 9,5 года в ускоренном или замедленном полете, и эти периоды можно сократить, обеспечивая большее ускорение; но здесь мы пренебрегаем требованиями мощности. При расстоянии 5,6 *парсек* экипаж проводит 4,2 года в полете с постоянной скоростью, и это время никак нельзя сократить; для расстояния 250 *парсек* почти все время проходит в полете с постоянной скоростью.

ОТНОШЕНИЕ МОЩНОСТЬ/МАССА И УСКОРЕНИЕ

Для осуществления межзвездных перелетов необходимо обеспечить скорость, близкую к скорости света, и, согласно выражению (3), для приемлемой эффективности мы должны иметь $V \approx S$. Взятые вместе, эти условия

приводят к требованию $S \approx c$. Далее, мы убедились, что полная аннигиляция вещества является единственной перспективой в качестве источника энергии в межзвездных космических полетах, а поскольку мы не можем расходовать все вещество на разгон ракеты, то остается лишь возможность использования пучка фотонов. В этом случае справедливо уравнение (21), и $b = P/c$.

Из выражения (16) легко видеть, что для того, чтобы τ_0 было мало, ускорение должно иметь как можно бо́льшую величину, но уже было принято, что b ограничено величиной $1g$.

Далее, если справедливо соотношение (21) и $b = 1g$, то отношение мощность/масса должно иметь максимальное значение

$$P = 3 \cdot 10^{13}\ \textit{см}^2/\textit{сек}^3, \tag{23}$$

т. е.

$$P = 3 \cdot 10^{6}\ \textit{вт/г} = 4 \cdot 10^{3}\ \textit{л. с./г}. \tag{24}$$

Чтобы понять сущность выражения (24), можно рассмотреть современные реакторы с самым высоким отношением мощность/масса. Судовые реакторы мощностью 15 *Мвт* и весом 800 *т* дают $P = 0{,}02$ *вт/г* — значение, которое в $1{,}5 \cdot 10^8$ раз ниже определяемого выражением (24). Если не принимать во внимание массу защитных сооружений, то самое высокое теоретически возможное значение будет $P = 100$ *вт/г*, что все-таки по-прежнему мало — меньше значения (24) в 30 000 раз. Фактически выражение (24) означает, что целый завод мощностью 15 *Мвт* (достаточно для удовлетворения нужд небольшого города) весил бы не более 5 *г* (вес 10 скрепок для бумаги). Другой пример: для выполнения условия (24) двигатель автомобиля мощностью 200 *л. с.* должен соответственно весить не более 50 *мг* — одна десятая веса скрепки.

Но это не все. Необходимо не только получить требующуюся энергию, ее еще надо должным образом использовать. Фотоны могут излучаться в оптическом и радиодиапазонах, и ракета будет двигаться, когда вся эмиссия происходит в одном направлении. Тогда (большой) передатчик мощностью 100 *квт* может дать ничтожную тягу массе в 30 *мг*, такой же эффект даст система прожекторов с общей мощностью 100 *квт*. Все это будет весить не более

$^1/_{15}$ веса бумажной скрепки. Следует учитывать требования к источнику мощности и передатчику, и масса, входящая в выражение (24), должна включать и реактор и передатчики.

Масса полезной нагрузки и горючего также должна быть включена в (24). Например, мы стартуем с «малым» космическим кораблем с полезной массой 10 *т*, а другие 10 *т* добавляются за счет источника энергии и эмиттеров. Для того чтобы достигнуть скорости, отличающейся от скорости света не более чем на 2% (с сокращением времени в 5 раз), необходимо $\mathfrak{M} = 10$ согласно (20 *г*), и полная масса ракеты составит 200 *т*. Из выражения (24) находим, что для получения $b = 1g$ требуется мощность в 600 млн. *Мвт*. Таким образом,

Для приближения к скорости света не менее чем на 2% за 2,3 года в системе ракеты потребовалось бы 40 млн. аннигиляционных установок мощностью по 15 *Мвт* каждая плюс 6 млрд. передающих станций по 100 *квт*, общая масса которых не должна превосходить 10 *т*, чтобы за 2,3 года в системе ракеты достичь скорости, отличающейся от скорости света не более чем на 2%. (25)

Если условие (25) не выполнено, уравнения для длительности периодов ускорения и замедления получаются следующим образом. Из (16а) имеем

$$\tau_0 = \frac{c^2}{P} \ln \mathfrak{M}, \tag{26}$$

а из (20а) и (20б)

$$t_0 = 2\frac{c^2}{P}\mathfrak{M} \tag{27а}$$

и

$$x_0 = \frac{c^3}{2P}(\mathfrak{M} - 2). \tag{27б}$$

Если, например, условие (25) не выполняется с запасом на множитель 10^6 (если мы имеем 40 установок плюс 6000 передатчиков, весящих в сумме 10 *т* — все еще фантастическая величина), то $b = 10^{-6}\ g$, и для приближения к скорости света не менее чем на 2% в системе ракеты должно пройти 2,3 млн. лет.

Иначе говоря, если целью является достижение ускорения, например $b = 100g$, чтобы реализовать полностью

преимущества «замораживания» членов экипажа, то умноженный на 100 вес всего оборудования, перечисленного в (25), не должен превышать 10 *т*; это значит, что источник энергии плюс эмиттеры должны давать выход мощности 6000 *Мвт/г*. Парселл [4] пришел к аналогичному заключению, изучая проблему в релятивистском приближении. Нельзя обойти эти трудности и нет никакой надежды преодолеть их.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различные аспекты проблемы, рассмотренные выше, не привели к определенному выводу об абсолютной невозможности межзвездных полетов. Мы нашли лишь минимальные времена полета при различных допущениях, а также условия достижения этих пределов. Это все, что можно сделать в настоящее время, и право окончательного вывода предоставляется читателю. Однако условия оказались столь жесткими, что лично автор приходит к следующему заключению: космические полеты даже в самом отдаленном будущем будут ограничены пределами нашей солнечной системы, и то же справедливо для любой другой цивилизации независимо от уровня ее развития. Таким образом, по-видимому, единственным способом связи между разными цивилизациями являются электромагнитные сигналы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoerner S., Science, 134, 1839 (1961). (См. настоящий сборник, стр. 278—295.)
2. Pierce J. R., Proc. I. R. E., 47, 1053 (1959).
3. Space Handbook, Austranautics and Its Applications, U. S. Govt. Print. Off., Wash., 1959, p. 113.
4. Purcell E. M., Brookhaven National Laboratory Lectures No. 1.

Дж. Коккони и Ф. Моррисон

15 ПОИСКИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ СИГНАЛОВ

До сих пор нет теорий, позволяющих выполнить надежную оценку вероятностей 1) образования планет, 2) возникновения жизни и 3) эволюции общества до высокого технического уровня. Что касается фактических данных, то они говорят в пользу того, что звезды главной последовательности с возрастом в несколько миллиардов лет могут обладать планетами, что из небольшого числа этих планет две (Земля и, весьма вероятно, Марс) благоприятствуют развитию жизни, что жизнь на одной из таких планет привела к образованию общества, способного к значительному научно-техническому прогрессу. Время жизни таких цивилизаций неизвестно; но представляется необоснованным отрицать то, что некоторые из них могут сохранять свою жизнеспособность в течение времени, значительно большего человеческой истории, и сравнимого, вообще говоря, с геологической шкалой времени. Отсюда следует, что вблизи некоторых звезд типа Солнца должны существовать цивилизации со значительно более широкими научными интересами и техническими возможностями, нежели те, которыми мы располагаем в настоящее время.

Членам такого общества наше Солнце должно представляться как возможное место для эволюции нового общества. Весьма вероятно, что в течение длительного времени они ожидают развития науки в этом обществе. Предположим, что уже давно они установили с нами одно-

стороннюю связь, которая могла бы быть обнаружена нами, и что они с нетерпением ждут из окрестностей Солнца ответных сигналов, которые бы дали им знать о том, что общество высокоразвитых цивилизаций пополнилось еще одним членом. Какой канал мог бы быть использован с этой целью?

ОПТИМАЛЬНЫЙ КАНАЛ

Межзвездная связь через галактическую плазму без дисперсии по направлению и времени распространения имеет практический смысл, насколько нам известно, лишь в случае электромагнитных волн.

Поскольку целью тех, кто работает на передачу, является обнаружение вновь появившегося общества, то можно предположить, что будет использован канал, который предъявляет минимальные требования к частотному и угловому разрешению детектора. Более того, сигнал не должен испытывать сильного затухания в космосе или в земной атмосфере. Радиоволны с частотой ниже ~ 1 *Мгц* и все сигналы с частотой выше молекулярных линий поглощения около 30 000 *Мгц* вплоть до космических γ-лучей, по-видимому, поглощаются в планетных атмосферах. Ширина полосы пропускания в ультрафиолетовой области и γ-лучах, представляющаяся практически возможной, требует применения либо очень высокой мощности источника, либо очень сложной техники. Широкий радиодиапазон от 1 до 10^4 *Мгц* по-прежнему остается самым лучшим выбором.

В радиодиапазоне источник излучения должен выделяться на фоне двух видов: 1) излучение их собственной звезды (считаем, что угловое разрешение приемной системы недостаточно для разрешения источника излучения и звезды, поскольку этот источник может находиться не дальше долей угловой секунды от звезды); 2) галактическое излучение вдоль луча зрения.

Рассмотрим зависимость интенсивности этих видов фона от частоты. Звезда, подобная спокойному Солнцу, излучала бы мощность, которая на расстоянии (в метрах) давала бы поток

$$\frac{10^{-15} f^2}{R^2} \ \textit{вт/м}^2\cdot\textit{гц}.$$

Если поток принимается зеркалом диаметром l_d, то принимаемая мощность есть поток, умноженный на l_d^2. Более или менее изотропная часть фона галактического излучения дает на зажимах антенны мощность

$$\frac{10^{-12,5}}{f}\left(\frac{\lambda}{l_d}\right)^2 (l_d)^2 \ \textit{вт/гц},$$

где первый множитель обусловлен непрерывным спектром галактического излучения, второй — угловым разрешением, третий — площадью приемной антенны. Таким образом, минимум мешающего сигнала определяется равенством этих двух членов. Минимум расположен на частоте

$$f_{\text{мин}} \approx 10^4 \left(\frac{R}{l_d}\right)^{0,4} \ \textit{гц}.$$

При $R = 10$ световых лет $= 10^{17}$ *м* и $l_d = 10^2$ *м* значение $f_{\text{мин}} \approx 10^{10}$ *гц*. Наиболее вероятно, что передатчик должен излучать в области этого широкого минимума.

На какой частоте нам искать сигнал? Длительный спектральный поиск слабого сигнала неизвестной частоты — чрезвычайно сложная задача. Но как раз в самом удобном участке радиодиапазона находится уникальный объективный стандарт частоты, который должен быть известен каждому наблюдателю во Вселенной: линия радиоизлучения нейтрального водорода на частоте 1420 *Мгц* ($\lambda = 21$ *см*). Разумно ожидать, что высокочувствительные приемники на эту частоту создаются уже на ранней стадии развития радиоастрономии. Так рассуждали бы и операторы предполагаемого источника излучения, и современное состояние нашей техники подтверждает эти ожидания. Поэтому мы считаем наиболее перспективными поиски в окрестностях 1420 *Мгц*.

ТРЕБОВАНИЯ К МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА

Интенсивность галактического фона вблизи линии 21 *см* приблизительно для $^2/_3$ площади небесной сферы составляет

$$\frac{dW_b}{dS\,d\Omega\,df} \approx 10^{-21,5} \ \textit{вт/м}^2\cdot\textit{стер}\cdot\textit{гц}.$$

Вблизи плоскости Галактики фон в 40 раз выше. Поэтому целесообразно провести расчет вначале для тех звезд, которые находятся в направлениях, далеких от плоскости Галактики.

Если для передачи используется зеркало диаметром l_s метров, то мощность, необходимая для создания на входе приемника такого же сигнала, какой дает фон, будет равна

$$\frac{dW_s}{df}=\frac{dW_b}{dSd\Omega df}\left(\frac{\lambda}{l_s}\right)^2\left(\frac{\lambda}{l_d}\right)^2 R^2=\frac{10^{-24,2}R^2}{l_s^2 l_d^2}\ \textit{вт/гц}.$$

Для передатчика и приемника, работающих с антеннами, аналогичными параболоиду в Джодрелл Бэнк ($l = 80$ *м*) и для расстояния $R \approx 10$ световых лет требуется мощность передатчика $10^{2,2}$ *вт/гц*, что выходит за пределы наших технических возможностей. Однако если размеры обоих зеркал такие же, как спроектированного Морской исследовательской лабораторией США ($l = 200$ *м*), то требуемая мощность уже в 40 раз меньше, что находится в пределах даже наших ограниченных возможностей.

Мы предполагали, что луч направляется на все звезды типа Солнца в его галактических окрестностях. Создание 100 постоянных установок описанного типа нельзя считать невозможным для общества, более высокоразвитого, чем наше. (Приняв сигнал, даже мы быстро построили бы много таких установок.) Тогда мы можем надеяться принять направленное на нас излучение от какой-нибудь звезды на расстоянии в несколько десятков световых лет.

ПОЛОЖЕНИЕ СИГНАЛА И ШИРИНА ПОЛОСЫ

В любом направлении вне плоскости Галактики линия 21 *см* излучается на фоне непрерывного галактического излучения. Для звезд, расположенных на большом угловом расстоянии от плоскости Галактики, поиск сигнала следует осуществлять вблизи этой волны. Однако неизвестные допплеровские смещения частоты, обусловленные движением невидимых планет, могут сместить частоту вверх или вниз от естественного лабораторного значения на ± 300 *кгц* (± 100 *км/сек*). Ближе к галактической плоскости, где присутствует сильное излучение в линии 21 *см*, частота источника была бы сдвинута в крыло естественной линии излучения, наблюдаемой с направления Солнца.

До тех пор пока направление приема не изменяется, величина полосы пропускания приемника не играет роли. Здесь определяющим является обычное выражение для флуктуации фона в радиометре

$$\frac{\Delta B}{B}\sim\sqrt{\frac{1}{\Delta f_d \tau}},$$

где Δf_d — полоса пропускания до детектора, τ — постоянная времени записывающего устройства после детектора. С другой стороны, фон, принимаемый приемником, равен

$$B=\frac{dW_b}{df}\Delta f_d \ \text{ и } \ \tau\sim\frac{\Delta f_d}{(\Delta B)^2}.$$

Если положить $\Delta\beta$ равным некоторому фиксированному значению, то время поиска T сигнала в интервале частот F равно

$$T=\frac{F\tau}{\Delta f_d}\sim\frac{F}{(\Delta B)^2}$$

независимо от полосы приемника Δf_d.

Разумеется, чем у́же полоса, тем слабее сигнал, который можно принять при условии $\Delta f_d > \Delta f_s$. Разумно было бы в качестве первого шага принять ширину полосы, обычную в практике наблюдений на волне 21 *см*, но время интегрирования τ взять больше, чем обычно. В несколько приемов интервал частот F был бы перекрыт при использовании постоянной времени порядка минут или часов.

ПРИРОДА СИГНАЛА И ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ

Обнаружение сигнала лучше всяких догадок. Мы вправе ожидать, что сигнал будет модулирован импульсами с периодом не очень большим или очень малым по сравнению с 1 *сек*, исходя из ширины полосы частот и вращения источника излучения. Сеанс передачи будет продолжаться, по-видимому, несколько лет, так как ответ-

ный сигнал не может вернуться раньше чем через время порядка 10 лет. Затем он повторяется сначала. Возможно, что некоторые виды сигналов будут изменяться с течением времени. Чтобы быть безошибочно опознанным в качестве искусственного сигнала, последний может содержать, например, последовательность малых простых чисел или простые арифметические суммы.

Первое усилие следовало бы направить на ближайшие звезды подходящего типа. В сфере с радиусом 15 световых лет 7 звезд по своей светимости и возрасту подобны Солнцу. Четыре из них расположены в областях фона низкой яркости. Это τ Кита, o_2 Эридана, ε Эридана и ε Индейца. Все они имеют отрицательные склонения. Три другие — α Центавра, 70 Возничего и 61 Лебедя — лежат вблизи галактической плоскости и потому проектируются на области с повышенной яркостью фона. В сфере с радиусом 50 световых лет среди звезд известного спектрального класса содержится около ста звезд подходящей светимости. В число кандидатов попадают все карликовые звезды главной последовательности между G0 и K2 с визуальными звездными величинами меньше $+6^m$.

Читатель вполне может отнести изложенные рассуждения к области научной фантастики. Мы добавим только, что все предыдущие выводы показывают, что существование межзвездных сигналов находится в полном согласии со всем, что мы знаем, и что если сигналы существуют, то дело за методами их обнаружения. Мало кто будет отрицать фундаментальное практическое и философское значение, которое имело бы обнаружение искусственных космических сигналов. Поэтому мы полагаем, что направленные поиски таких сигналов заслуживают того, чтобы на них были затрачены большие усилия. Трудно оценить вероятность успеха, но если не производить поисков совсем, вероятность успеха равна нулю.

Ф. Д. Дрейк

16 КАК МОЖНО ПРИНЯТЬ РАДИОПЕРЕДАЧИ ИЗ ОТДАЛЕННЫХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ?

Вопрос о том, существует ли разумная жизнь во Вселенной за пределами солнечной системы, давно привлекал внимание, но остался без ответа. Оптические телескопы неспособны помочь в решении этой проблемы. Даже для обнаружения планет около ближайших звезд требовался бы очень большой телескоп, вынесенный за пределы земной атмосферы, например на Луну. Судить же о наличии разумной жизни вообще невозможно.

Может ли радиотелескоп принять передачи разумных существ на межзвездные расстояния? Легко показать, что расстояние R, на котором сигнал еще наблюдаем, выражается в большинстве случаев приведенной ниже формулой. Для примера рассмотрим возможности 85-футового радиотелескопа Национальной радиоастрономической обсерватории при приеме радиолокационных сигналов.

Такой сигнал может быть аналогичен излучаемому радарной антенной Миллстон-Хилл в Вестфорде (шт. Массачусетс), когда он, отразившись от Венеры, приходит назад [1]. В такие моменты эффективная излучаемая мощность P_e составляет 10^{10} *вт*, а ширина полосы частот B равна 10 *гц*. 85-футовое зеркало имеет эффективную площадь $A = 370$ *м*^{2}, температура шумов T при использовании мазера может быть около $10°$ K и постоянная времени t — около 100 *сек*.

Подставляя в формулу эти значения, получим, что эти радарные передачи можно принимать с расстояния

8,7 светового года! Это расстояние равно расстоянию до Сириуса и вдвое больше расстояния до α Центавра (см. рис. 1). Благодаря нашим большим антеннам и новым

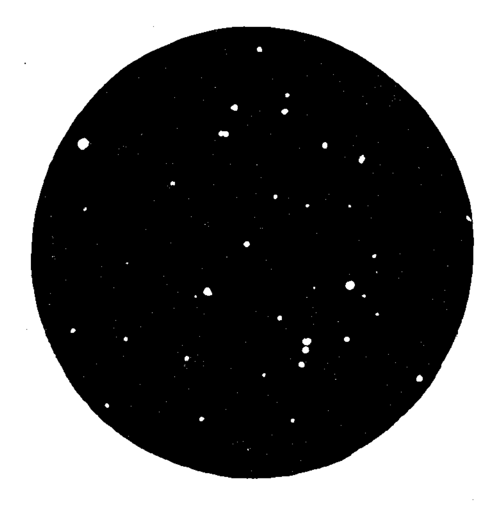


Рис. 1. На этой трехмерной модели, изготовленной Саррой Липпенкотт, показаны все известные звезды в пределах расстояния 16 световых лет от Солнца (в центре), как они видны с направления на точку весеннего равноденствия. Тройная звезда α Центавра находится ниже и левее Солнца; Альтаир — крупная звезда на левом краю; Сириус — самая крупная звезда в правой части модели.

чувствительным приемникам мы уже в состоянии принимать радиопередачи разумных существ с межзвездных расстояний.

Расстояние приема космических радиосигналов

$$R = 8\cdot 10^{-6}\left(\frac{P_e A}{T}\right)^{1/2}\left(\frac{t}{B}\right)^{1/4} \text{ световых лет.}$$

R — расстояние, до которого можно наблюдать сигнал;
P_e — эффективная мощность, излучаемая в направлении на Землю, выраженная в ваттах;

A — эффективная площадь приемной антенны в квадратных метрах;
T — шумовая температура приемника в градусах Кельвина;
t — постоянная времени приемника в секундах;
B — принимаемая полоса частот (т. е. полоса пропускания приемника) в герцах.

Для детального ознакомления с терминами, используемыми в этой формуле, и с радиоприемниками читатель отсылается к статье Дрейка [2].

Когда приемной антенной служит параболический рефлектор, можно пользоваться приближенным правилом: расстояние в световых годах, на которых еще возможен прием сигналов современных мощных передатчиков, равно диаметру антенны в футах, поделенному на 10. Итак, 600-футовая антенна Грин Бэнк, Западная Виргиния, в состоянии принимать такие передачи с расстояния 60 световых лет, в то время как 1000-футовая чаша Корнелльского университета в Пуэрто-Рико и проектируемая NRAO 1000-футовая антенна будут способны «просматривать» пространство на расстоянии до 100 световых лет. В сфере такого радиуса находится около 10 000 звезд.

Трудно предсказать, какая часть из этих звезд имеет планеты, населенные развитыми цивилизациями. Долгие годы образование солнечной системы связывалось со случайным столкновением двух звезд или с каким-либо другим маловероятным событием. Далее, развитие жизни на планетах представлялось очень редким явлением. Это привело к пессимистической картине распространенности жизни во Вселенной.

Однако в недавнее время стало очевидным, что образование второго тела или тел является частью процесса образования звезды. Возможно, что большинство звезд, не являющихся членами двойных или кратных систем, сопровождаются семействами планет или астероидов. Согласно Струве [3], по крайней мере несколько процентов всех звезд имеют планеты.

Какая часть этих планет может быть населена разумными существами? Пионерские опыты Миллера в Чикагском университете, как и более поздние исследования, показали, что сложные органические молекулы вполне

могли образоваться в больших количествах в начальный период истории Земли или любой подобной планеты. Эти молекулы, являющиеся основными строительными «кирпичами» жизни, должны появиться и на других планетах как раз потому, что это произошло на Земле.

Тогда мы можем ожидать, что жизнь является весьма общим для планет явлением. Но в недавних работах Кордилевский (Польша) и Су-Шу Хуанг (США) обратили внимание на тот факт, что жизнь будет развиваться только на тех планетах, которые находятся от звезды на расстояниях, подходящих с точки зрения температуры. Этот фактор ограничивает число пригодных для жизни планет до небольшого числа в каждой планетной системе, в том числе и в нашей. Звезда должна иметь большое время жизни и не испытывать существенных изменений светимости в течение нескольких миллиардов лет, т. е. времени, необходимого для эволюции разумных существ из совокупности органических молекул. В результате приходится ограничиться планетами звезд главной последовательности спектральных классов F, G, K и, возможно, M. Однако звезды этих классов составляют около половины от общего числа звезд.

Возрасты звезд различны. В сочетании с большой вероятностью того, что биологическая эволюция на разных планетах идет с различной скоростью, это означает что современный уровень развития может сильно изменяться от планеты к планете. По-видимому, в качестве среднего значения можно принять возраст Солнца. Таким образом, возможно, что в Галактике существуют как более, так и менее развитые цивилизации по сравнению с нами.

Из всех этих соображений следует, что мощные передачи могут вестись разумными существами из окрестностей в лучшем случае 25% звезд и в худшем — одной из миллиона звезд, причем последняя оценка, предложенная Харлоу Шепли в его книге «Звезды и люди», является весьма осторожной. Очевидно, эти оценки не являются особенно полезными, за исключением одной стороны проблемы: они делают существенной вероятность того, что по меньшей мере вблизи одной из 10 000

звезд, которые вскоре окажутся в пределах нашей досягаемости, обитает цивилизация, использующая радиотехнику. В таком случае целесообразно применить наши технические достижения для обнаружения межзвездных радиосигналов (см. рис. 2).

Какая частота является наилучшей для поисков? Рассмотрим теперь то, что можно назвать «принципом технического совершенства». Применение радиосвязи насчитывает лишь 50 лет; в настоящее время мы лишь начинаем приближаться к технически совершенной аппаратуре и в пределах ближайших 50 лет будем обладать ею. Под *техническим совершенством* мы подразумеваем такое состояние развития техники, когда пределы чувствительности аппаратуры определяются не ее недостатками, например шумами приемника, а естественными явлениями, над которыми человек не имеет контроля. Это такое состояние, когда дальнейшее совершенствование аппаратуры не имеет смысла.

Столетие составляет лишь около одной стомиллионной доли возраста нашей Галактики. Таким образом, в галактической шкале времени цивилизация мгновенно переходит от состояния неспособности использовать радио к техническому совершенству в области радиотехники. Если бы мы имели возможность исследовать большое число населенных планет, то априори можно было бы ожидать в каждом случае либо полного невежества в радиотехнике, либо полного совершенства. Это и есть принцип технического совершенства. Наша цивилизация может быть одной из чрезвычайно малого числа цивилизаций, переживающих переходный период между двумя состояниями — фактически это может быть особенностью, характерной только для одного человечества.

Поэтому логично предположить, что цивилизации, сигналы которых мы можем принять, уже достигли технического совершенства в области радиотехники. Передачи, которые мы собираемся искать, будут вестись, очевидно, с очень большой мощностью и предназначаться для передачи большого количества информации на далекие расстояния. Будут избраны частоты, на которых естественные ограничения минимальны. Из этих ограничений особо важны два: фон галактического радиоизлучения

и шумы планетной атмосферы, если прием сигнала ведется на поверхности планеты.

Действие обоих этих факторов аналогично увеличению шумов приемной системы. На рис. 2 показана частотная зависимость шумовой температуры неба в радиодиапазоне для каждого из этих факторов и их суммарного эффекта.

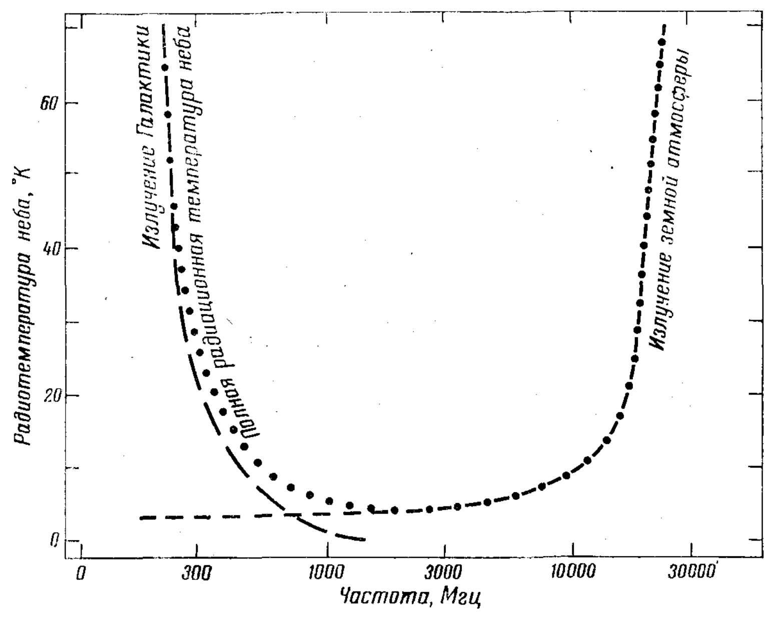


Рис. 2. Некоторая вероятность принять передачи внеземных существ имеется только в относительно узком интервале радиочастот. На низких частотах прием таких сигналов затрудняется из-за наличия шумов галактического происхождения; на высоких частотах над ними преобладает излучение земной атмосферы. Здесь изображены оба этих мешающих излучения, а также их сумма — полная температура излучения неба.

Последняя кривая определяет температуру шумов идеального приемника. Очевидно, наиболее пригодными для нас частотами являются те, на которых полная шумовая температура неба минимальна.

Например, с поверхности планеты, подобной Земле, оптимальным для приема является интервал частот от

1000 до 10 000 *Мгц*. Но если прием производится вне атмосферы, что можно допустить на основании принципа технического совершенства и наших успехов в создании искусственных спутников Земли, то область оптимальных частот расширяется за пределы 10 000 *Мгц*.

Джузеппе Коккони и Филип Моррисон (Корнелльский университет, США) сделали следующий шаг [4]. Они считают, что космические цивилизации могли направить мощные пучки радиоволн на своих ближайших соседей с целью установить в кратчайшее время двустороннюю радиосвязь. При такой попытке была бы использована частота, на которой уже в самом начале развития радиотехники цивилизации Галактики имели бы высокочувствительные узкополосные радиотелескопы. В пределах Галактики такой частотой вполне может служить 1420 *Мгц*, частота линии 21 *см* межзвездного нейтрального водорода.

Все эти доводы заставляют нас ограничить поиски интервалом от 1000 до 10 000 *Мгц*, причем частоты вблизи 1420 *Мгц* обещают наибольшую вероятность успеха.

Какими характеристиками будут обладать искомые сигналы? Теория связи утверждает, что чем у́же полоса частот передаваемого сигнала определенной фиксированной мощности, тем больше дальность передачи сигнала. Поскольку наша задача состоит в приеме передач большой мощности, основной целью которых является преодоление больших расстояний, то можно ожидать, что сигналы будут узкополосными. Это является преимуществом, так как позволит отличить сигналы от космических шумов естественного происхождения с чрезвычайно широкой полосой частот.

Следует ожидать заметного короткопериодического доплеровского смещения частоты передаваемого сигнала вследствие возможного орбитального обращения передатчика вокруг звезды или планеты. Это смещение поможет отличить сигналы от космических шумов и от земных помех. Мощность сигнала может испытывать вариации со временем, если сигнал несет в себе кодированную информацию, а также, возможно, благодаря изменению ориентации Земли по отношению к передатчику. Наконец, передачи следует ожидать с направления на ближайшие звезды.

Резюмируя, можно сказать, что приемник, предназначенный для приема межзвездных космических радиосигналов на поверхности Земли, должен:

1. Работать на частоте выше 1000 *Мгц*, желательно вблизи 1420 *Мгц*.
2. Иметь набор различных полос пропускания, включая 10 *гц* и меньше.
3. Обладать стабильностью частоты настройки: за время интегрирования она должна изменяться на величину, значительно меньшую ширины полосы пропускания — не более чем на 1 *гц* за несколько минут.
4. Иметь возможно более высокую чувствительность.
5. Исключать, насколько это возможно, шумы приемника.
6. Отличать сигнал от широкополосного космического шума, если это возможно.
7. Подавлять земные помехи, похожие по характеру на искомый сигнал.

С целью приема космических радиопередач NRAO начала осуществление проекта «Озма». (Он назван по имени королевы сказочной страны Оз — очень далекой, труднодоступной и населенной экзотическими существами.) Заканчивается изготовление радиометра, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям. Почти вся сборка и настройка были выполнены У. Уолтменом и Р. У. Мидоузом.

Для хотя бы частичного исключения земных помех в фокусе параболоида расположены рядом два рупора. Диаграмма направленности антенны с одним из этих рупоров направлена на исследуемую звезду, а с другим — на область неба в сторону от нее. По мере электрического переключения входа приемника с одного рупора на другой телескоп оказывается «смотрящим» то на звезду, то на небо рядом с ней. Тогда излучение звезды будет модулировано импульсами, длительность которых определяется частотой модулирующего напряжения. Синхронные детекторы на выходе приемника пропускают лишь импульсы, синхронизованные с темпом переключения, т. е. детектируют лишь искомый сигнал. Исключаются шум приемника, а также земные помехи.

Помехи попадают в антенну радиотелескопа преимущественно прямо через рупор, минуя отражение от зеркала. В этом случае оба рупора примут одинаковую по величине помеху, и когда происходит переключение с одного рупора на другой, то уровень помехи, попадающей в приемник, не будет изменяться. В результате помеха оказывается немодулированной, и синхронные детекторы не пропускают ее.

В существующем приемнике непосредственно за переключателем включен параметрический усилитель, который в будущем будет заменен мазером.

Сигнал испытывает четырехкратное преобразование по частоте, что обусловлено малостью последней промежуточной частоты вследствие требования узкополосности. Частота сигнала, принимаемого радиометром, прямо зависит от частот четырех гетеродинов, напряжения которых смешиваются с сигналом для образования промежуточной частоты. При наших требованиях частота всех четырех гетеродинов должна иметь стабильность лучше 1 *гц* за 100 *сек*, если к стабильности частоты настройки предъявляются те же требования.

Труднее всего выполнить это условие в случае первого гетеродина, частота которого около 1390 *Мгц* и который должен сохранять это значение с точностью 10^{-9}. Эта стабильность достигается посредством специального кварцевого генератора, кристалл которого поддерживается при постоянной температуре внутри двойного термостата. Частота выходного напряжения этого генератора умножается до значения частоты первого гетеродина.

Генератор частотных меток применяется для формирования слабых сигналов на многих фиксированных частотах из напряжения стабильного по частоте генератора. Эти сигналы вводятся в приемник для определения точного значения частоты, на которой работает приемник, что позволяет обнаружить эффект Допплера.

После усиления сигнала по четвертой промежуточной частоте один фильтр вырезает широкую полосу частот — полосу сравнения, а другой — узкую, или полосу сигнала. Коэффициенты усиления подобраны таким образом, что когда на фильтры подается очень широкополосный шум, то их выходные напряжения равны друг другу. Когда эти напряжения подаются на дифференцирующую цепочку, выходное напряжение последней равно нулю.

Но узкополосный сигнал занимает лишь часть полосы сравнения и всю полосу сигнального фильтра. При этом выходное напряжение узкополосного фильтра больше, чем широкополосного, и на дифференцирующей цепочке возникает напряжение. При использовании компенсационного выхода радиометр чувствителен только к узкополосным сигналам. В нашем случае радиометр настраивается на сигналы с полосой 40 *гц*. В реальном приемнике фильтры имеют переменные величины полос пропускания, и можно быстро установить одну из них.

Фильтры, включенные до синхронных детекторов, пропускают лишь частоты, к которым чувствительны детекторы, и вырезают из спектра другие частоты, которые могут нарушать их работу.

Мы убеждаемся в том, что напряжение на выходе синхронного детектора появится лишь в том случае, когда принимается сигнал одним из рупоров, т. е. искомый сигнал с заданного направления. Интегратор лишь накапливает сигнал в течение определенного интервала времени. Два других синхронных детектора и интегратора, подключенные прямо к каналам полосы сравнения и полосы сигнала, служат для контроля за работой радиометра.

Радиометр вступит в эксплуатацию с 85-футовой антенной в начале этого года. Первые подлежащие изучению объекты — τ Кита и ε Эридана, две звезды типа Солнца на расстоянии 11 световых лет. Будут изучаться также неотождествленные источники радиоизлучения, близкие к этим звездам.

Представляется вероятным, что когда-нибудь этот или подобный ему проект поиска искусственного сигнала увенчается успехом. Нет необходимости доказывать, что такое открытие будет иметь громадное научное и философское значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sky and Telescope, 384 (May 1959).
2. Drake F. D., Sky and Telescope, 26 (Nov. 1959); 87 (Dec. 1959).
3. Struve O., Sky and Telescope, 154 (Jan. 1960).
4. Cocconi G., Morrison P., Nature, 844 (Sept. 1959).
5. Sky and Telescope, 26—28 (Nov. 1959).

Ф. Д. Дрейк

17 ПРОЕКТ «ОЗМА»

Проект «Озма» представляет собой первый организованный систематический поиск признаков внеземной разумной жизни с помощью высокочувствительной аппаратуры. Эта программа выполнялась при помощи 85-футового радиотелескопа в течение мая, июня и июля 1960 г. Предметом поиска были радиосигналы разумных существ вблизи частоты 1420,4 *Мгц*, на которой излучает атомарный водород. Был использован специальный приемник, обладавший высокой чувствительностью, узкой полосой пропускания, хорошей стабильностью частоты настройки и способностью сильно подавлять радиопомехи земного происхождения. Для приема сигналов, намного более слабых, чем шумы приемника, использовался модуляционный радиометр, причем в качестве первой усилительной ступени применялся параметрический усилитель на полупроводниковом диоде.

При направлении телескопа на τ Кита и ε Эридана был исследован интервал частот в 400 *кгц*. Эти звезды были избраны в качестве «мишеней» потому, что это ближайшие к нам одиночные звезды типа Солнца. В течение всего поиска использовалась полоса 100 *гц*.

В этом предварительном цикле наблюдений не было обнаружено сигналов внеземного происхождения. Мы считаем, что сигналы были бы обнаружены, если бы их полоса частот была меньше 100 *гц*, а эффективная, излучаемая передатчиком мощность — 10^{13} *вт* или больше. Это при-

близительно эквивалентно передатчику мощностью 1 *Мвт*, работающему на антенну диаметром 600 футов. После этой первой серии поиск был прекращен ввиду необходимости использования антенны для других задач.

С тех пор продолжалась разработка способов обнаружения внеземной жизни. Она привела к выводу, что усовершенствованные методы переработки информации, в частности выделение корреляционной функции радиометрических записей и регистрация, кроме амплитудной, фазовой информации, могут повысить чувствительность к искусственным сигналам внеземного происхождения. Применение лазера сделает возможным осуществление поиска в оптическом интервале спектра, но поиск на радиочастотах имеет все-таки большие шансы на успех. Теперь стало очевидным также, что большое число частот и звезд, которые необходимо проверить при поисках сигнала, требует создания устройства, способного воспринимать и перерабатывать очень большое количество информации. *Поэтому для будущих исследований необходимы многоканальные* приемники или эквивалентные им сложные системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Drake F. D., Phys. Joday, 14, 40 (1961).
2. Golay M. J. E., Proc. I. R. E., 49, 953 (1961).

Дж. Уэбб

18 ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗУМНЫХ СИГНАЛОВ ИЗ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Цель настоящей статьи — рассмотреть возможности космической радиосвязи в межзвездных масштабах и проанализировать методы, которые можно для этого использовать.

В высшей степени невероятно, чтобы разумные существа в других звездных системах постоянно вели радиопередачи в направлении Солнца в надежде, что околосолнечные разумные существа в процессе эволюции достигнут, наконец, такого состояния, когда они будут способны отозваться на эти сигналы. Хотя эту возможность полностью исключить нельзя, но более перспективным может оказаться другой подход к проблеме.

В качестве исходной точки для анализа может служить современное положение в солнечной системе. Земля здесь является единственной планетой, ведущей передачи искусственных сигналов, но Земля ведет их почти на всех частотах радиодиапазона. Ни одна из этих передач не направлена в сторону наших звездных соседей с целью установления связи. Фактически, если бы даже такие передачи и имели некоторые шансы на успех, это еще не означало бы, что именно такое начало было бы желательным.

Поэтому представляется более вероятным, что для станций радиоприема было бы более перспективно в смысле установления связи пытаться принять сигнал на частотах, которые могут использоваться какими-то другими

существами для обороны, связи и других задач. Хотя такие передачи могут вестись на любой частоте от радиочастот до ультрафиолета, есть основания полагать, что развитая цивилизация использует диапазон сверхвысоких частот. Дело в том, что на радиоволнах и миллиметровых волнах приемники излучения имеют наибольшую чувствительность. Кроме того, в этом участке спектра трудности, связанные с геометрическим ослаблением и строительством антенны, не являются непреодолимыми.

С длинноволновой стороны радиодиапазона чувствительность приемника ограничена радиоизлучением Галактики. Уровень этих шумов сильно меняется от одного участка неба к другому, но в среднем уменьшается с частотой, согласно следующей зависимости:

$$T_g = \frac{k_g}{f^{2,3}}, \quad (1)$$

где T_g — эквивалентная температура шумов приемника, обусловленная галактическим радиоизлучением; k_g — коэффициент пропорциональности; f — частота. Значения k_g меняются, но максимальные и минимальные средние значения относятся к экватору и полюсу Галактики.

Верхний предел интервала частот, пригодного для связи, зависит от трассы радиосвязи — осуществляется ли связь через атмосферу (Земля — космос) или минуя ее (космос — космос). Для линии Земля — космос поглощение атмосферным кислородом и водяными парами ограничивает минимальную температуру шумов приемника значением около 10° К. Практические трудности, например наличие боковых лепестков антенны, затрудняет в настоящее время достижение даже этой величины. Частота минимальных шумов расположена в интервале от 1000 до 7000 *Мгц*, в зависимости от области неба.

Для линии связи космос — космос, когда можно не учитывать поглощение, основным фактором, ограничивающим снизу минимальную температуру шумов, становятся квантовые шумы. Их можно характеризовать эквивалентной температурой шумов приемника

$$T_q = \frac{h}{k} f, \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана.

Минимальная температура шумов для связи в космосе составляет около 0,2—10° К. Частота этого минимума заключена между 3000 и 10 000 *Мгц* в зависимости от области неба.

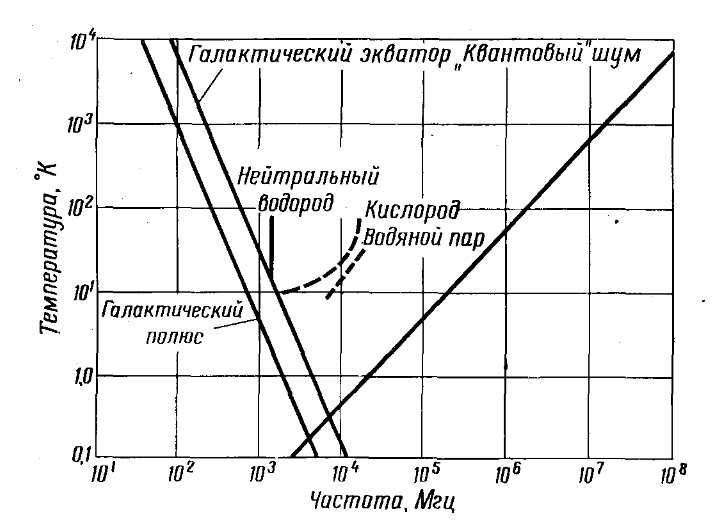


Рис. 1. Естественные источники шумов.

На рис. 1 приведены частотные зависимости температуры шумов Галактики для экватора и полюса Галактики, а также температуры шумов вследствие поглощения водяным паром и квантовых шумов. Заметим, что для приемника, работающего на поверхности Земли, минимальная температура шумов около 10° К реализуется в интервале 1000—7000 *Мгц*. Для приемника за пределами атмосферы на частотах от 3000 до 10 000 *Мгц* можно добиться шумовой температуры приемника в пределах 0,2—1,0° К.

Полную мощность шумов приемника P_n можно выразить следующим образом:

$$P_n = kTB, \quad (3)$$

где B — ширина полосы пропускания приемника, а

$$T = \Sigma T_g + T_q + \ldots + T_x; \quad (4)$$

выражение (4) включает эквивалентные температуры шумов из-за потерь, атмосферных шумов, промышленных помех и т. п.

Последние успехи в области создания мазеров и параметрических усилителей позволяют построить приемник с очень низким значением шумовой температуры. Последующее развитие принесет, несомненно, еще большие успехи. Но на рис. 1 указаны теоретические нижние пределы шумов без учета тепловых шумов приемника. Интересно отметить, что нет необходимости охлаждать приемник, работающий в оптическом интервале частот, так как квантовые шумы уже ограничивают минимальную температуру шумов приемника, которую можно получить при комнатной или более высокой температуре. То же самое справедливо и для радиочастот ниже сотен мегагерц, причем в этом случае это обусловлено высокой яркостной температурой фона галактического радиоизлучения.

Затухание в свободном пространстве α в децибелах

$$\alpha = 91 + 20 \lg d - 20 \lg D, \tag{5}$$

где d — расстояние в морских милях (1 миля = = 1,825 *км.— Ред.*), D — диаметр приемной антенны в футах (1 фут = 30,3 *см.* — *Ред.*) Выражение (5) справедливо для передатчика, работающего на всенаправленную антенну. Поэтому вместо добавления усиления передающей антенны в (5) удобнее считать, что передаваемая мощность уже умножена на усиление.

Один световой год равен $5{,}1 \cdot 10^{12}$ морским милям. Для 100-футовой приемной антенны и расстояния 10 световых лет затухание, согласно (5), составит 325 *дб*. Возвращаясь к (3) и подставляя оптимистичные значения 10° К и 10 *гц* для ширины полосы, получим для мощности шумов приемника $1{,}38 \cdot 10^{-22}$ *вт*, или —209 *дб·вт*. Это означает, что передатчик, находящийся на расстоянии 10 световых лет, должен иметь произведение мощности на усиление около 116 *дб·вт*; только тогда отношение сигнала к шуму на входе приемника сравняется с 1:

$$P_r = P_t - \alpha, \tag{6}$$

где P_r — принятая мощность сигнала (в *дб·вт*), P_t — передаваемая мощность (в *дб·вт*). Другими словами, передатчик мощностью 1 *Мвт* должен работать на антенну с усилением 56 *дб*, чтобы можно было принять его сигнал.

На рис. 2 и 3 показаны кривые зависимости требующейся мощности, умноженной на усиление антенны, от ширины полосы пропускания для приемников с шумами 10 и 1° К соответственно. Кривые относятся к антеннам различных размеров — от 100 до 10 000 футов.

В настоящее время совершенно очевидно, что большинство из так называемых «больших антенн» слишком малы, чтобы эффективно служить для космической связи. Большинство антенн с диаметром более 100 футов предназначены для работы на относительно низких частотах и непригодны по качеству поверхности для использования на сантиметровых волнах. Ожидается, что эта ситуация в будущем изменится к лучшему, благодаря применению новых методов. Один из таких проектов предусматривает строительство 600-футовой параболической антенны, снабженной механически компенсирующими сервомеханизмами, что позволяет вести прием сигналов на самых коротких волнах сантиметрового диапазона. С помощью этих методов теоретически возможно создавать антенны неограниченно больших размеров.

Механические трудности возрастают с усилением антенны. В прошлом усиление 40 *дб* считалось границей, выше которой уже трудно реализовать механическую часть проекта. Что касается оптических телескопов, то там значительно более высокие значения усиления не только возможны, но и являются обычными. Самым ярким примером этого может служить 200-дюймовый оптический телескоп обсерватории Маунт Паломар. Если отнести «усиление» к длине волны 4400 Å (приблизительный центр видимой области спектра), то мы получим величину 180 *дб*!

Вообще говоря, сравнение такого рода не совсем удачно, так как ситуация в обоих случаях несколько различна. Однако это сравнение может служить для иллюстрации того, что оптические телескопы достигли в своем развитии значительно более высокого уровня, чем их радиоаналоги. До недавнего времени почти не проявлялось интереса к строительству больших антенн. Радиоастрономия первая предъявила к ним требования как

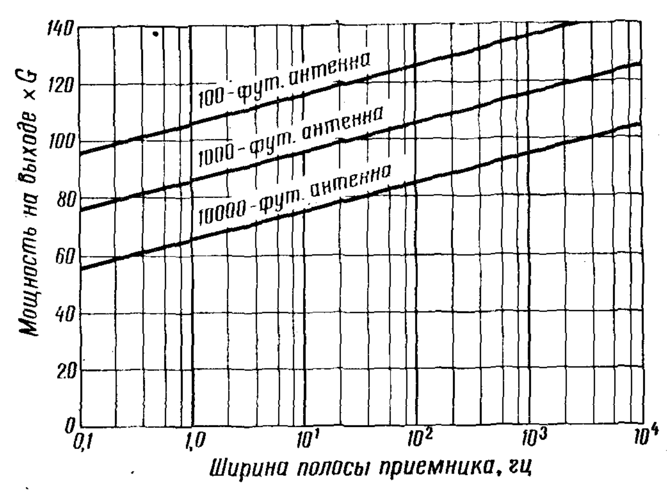


Рис. 2. Выходная мощность передатчика, работающего на расстоянии 10 световых лет, необходимая для приемника с уровнем шумов 10° К.

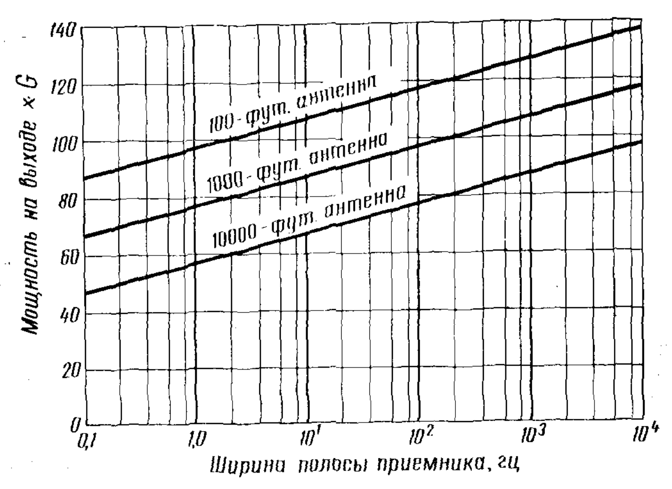


Рис. 3. Выходная мощность передатчика, работающего на расстоянии 10 световых лет, необходимая для приемника с уровнем шумов 1° К.

к инструментам, дополняющим оптические телескопы. По-видимому, только космическая радиосвязь и межзвездные сообщения потребуют создания еще более совершенных радиотелескопов. Действительно, нет антенны такого «универсального» размера, которая могла бы удовлетворить всем этим требованиям. Точно так же, как в случае оптических телескопов, перед наукой всегда будут стоять нерешенные вопросы, которые будут требовать создания более крупных антенн.

На орбите вокруг Земли можно будет создать антенны значительно бо́льших размеров, чем это возможно на поверхности Земли. Но несмотря на отсутствие силы тяжести, остается много проблем; в частности, доставка элементов системы потребует развитой «космической» технологии. Объекты на низких орбитах, особенно большие и легкие структуры, будут испытывать дополнительное воздействие градиента силы тяжести и сопротивления атмосферы. Высокая температура Земли и затенение Землей также является одной из проблем. На более высоких орбитах важную роль играют повышенная радиация и возрастающие трудности доставки, но меньше сказываются градиент силы тяжести, сопротивление атмосферы и затенение Землей. В обоих случаях придется столкнуться с проблемой солнечного ветра и неравномерного нагрева. Проблема нагрева может оказаться столь серьезной, что может привести к необходимости заключать всю антенну в баллон для того, чтобы точнее можно было контролировать тепловые напряжения конструкций.

Наконец, в качестве возможного места для строительства большой антенны можно рассмотреть Луну. На поверхности Луны атмосферное поглощение пренебрежимо мало, а сила тяжести в шесть раз меньше земной. Однако силой тяжести на Луне пренебречь нельзя, а проблема неравномерного нагрева солнечным излучением здесь тоже остается. Конечное значение температуры поверхности Луны также является ограничением на температуру шумов приемных устройств, так же, впрочем, как и в случае низких спутников Земли. Это связано с невозможностью подавить все боковые лепестки антенны, которые ограничивают минимальную шумовую температуру антенны.

Несмотря на внедрение автоматики, весьма вероятно, что более совершенные внеземные обсерватории будут обслуживаться человеком. Хотя и орбитальная, и лунная обсерватории требуют хорошей службы снабжения, лунная станция имеет все-таки определенные преимущества, так как жилища, склады и другие строения могут находиться при более обычных условиях. Преимущества стационарной базы, без сомнения, имеют важное значение для нормального функционирования станции.

Имея в виду, что создание больших антенн возможно, продолжим рассмотрение возможностей установления контактов с разумными существами других миров. Табл. 1 содержит список 55 ближайших к Солнцу звезд в порядке возрастания их расстояний. Расстояние до ближайшей звезды, α Центавра, составляет около 4,3 световых лет, но большое число звезд попадает в интервал расстояний от 10 до 20 световых лет. Число звезд в списке быстро возрастает с увеличением расстояния от Солнца. Поэтому вероятность обнаружения признаков разумной жизни должна очень быстро увеличиваться с развитием радиотелескопов.

Касаясь возможности существования планет около других звезд, Бриггс [3] сказал: «Скорость вращения всякой звезды можно определить по виду профиля линий в ее спектре... По-видимому, около 67% звезд нашей Галактики вращаются медленно, что означает, что с этими звездами связаны планеты». Он продолжает: «Хотя по проблеме возникновения жизни среди биологов нет полного согласия, работы Опарина и других показывают, что жизнь возникает посредством сложного физико-химического процесса на любой подходящей для этого планете».

Вернемся еще раз к кривым рис. 2 и 3; там были рассмотрены лишь статические условия. Скажем, жители планеты, с которой передается сигнал, могут использовать антенну с очень высоким коэффициентом направленного действия. Если только эта антенна не стабилизирована таким образом, чтобы ее луч всегда был направлен в сторону солнечной системы (компенсация вращения планеты), то сигнал будет приниматься лишь в течение ограниченных промежутков времени, пока луч пересекает солнечную систему. Время, в течение которого этот сигнал

Таблица 1

Расстояния и величины ближайших к Солнцу звезд
(ближе 5 *парсек*)

№	Звезда	Визуальная звездная величина	Спектральный класс	Расстояние, световые годы	Абсолютная визуальная величина	Визуальная светимость
1	Солнце	—26,9	G0		4,7	1,0
2	α Центавра А	0,3	G0	4,29	4,7	1,0
3	α Центавра В	1,7	K5	4,29	6,1	0,28
4	α Центавра С	11	M	4,29	15,4	0,000052
5	Звезда Барнарда	9,5	M5	5,98	13,2	0,0004
6	Вольф 359	13,5	M8	7,74	16,6	0,000017
7	Лейтен 726-8A	12,5	M6	7,9	15,6	0,00004
8	Лейтен 726-8B	13,0	M6	7,9	16,1	0,00003
9	Лаланд 21 185	7,5	M2	8,2	10,5	0,0048
10	Сириус А	—1,6	A0	8,7	1,3	23
11	Сириус В	7,1	A5	8,7	10,0	0,008
12	Росс 154	10,6	M6	9,3	13,3	0,00036
13	Росс 248	12,2	M6	10,3	14,7	0,0001
14	ε Эридана	3,8	K2	10,8	6,2	0,25
15	Росс 128	11,1	M5	10,9	13,5	0,0003
16	61 Лебедя А	5,6	K3	11,1	7,9	0,052
17	61 Лебедя В	6,3	K5	11,1	8,6	0,028
18	Лейтен 789-6	12,2	M7	11,2	14,5	0,00012
19	Процион А	0,5	F5	11,3	2,8	5,8
20	Процион В	10,8	—	11,3	13,1	0,00044
21	ε Индейца	4,7	K5	11,4	7,0	0,12
22	Σ 2398 А	8,9	M4	11,6	11,1	0,0028
23	Σ 2398 В	9,7	M4	11,6	11,9	0,0013
24	Грумбридж 34 А	8,1	M2	11,7	10,3	0,0058
25	Грумбридж 34 В	10,9	M5	11,7	13,1	0,00044
26	γ Кита	3,6	K0	11,8	5,8	0,36
27	Лакайль 9352	7,2	M0	11,9	9,4	0,013
28	BD+5° 1688	10,1	M4	12,4	12,2	0,001

Продолжение табл. 1

№	Звезда	Визуальная звездная величина	Спектральный класс	Расстояние, световые годы	Абсолютная визуальная величина	Визуальная светимость
29	Лакайль 8760	6,6	M0	12,8	8,6	0,028
30	Звезда Каптейна	9,2	M0	13,0	11,2	0,0025
31	Крюгер 60 A	9,9	M4	13,1	11,9	0,0013
32	Крюгер 60 B	11,4	M6	13,1	13,4	0,00033
33	Росс 614	10,9	M7	13,1	12,9	0,00052
34	BD—12° 4523	10,0	M5	13,4	11,9	0,0013
35	Звезда ван Маанена	12,3	G	13,8	14,2	0,00016
36	Вольф 424 A	12,6	M4	14,6	14,3	0,00014
37	Вольф 424 B	12,6	M4	14,6	14,3	0,00014
38	Грумбридж 1618	6,8	K6	14,7	8,5	0,03
39	CD—37°15 492	8,6	M4	14,9	10,3	0,0058
40	CD—46°11 540	9,7	M4	15,3	11,3	0,0023
41	BD+20°2465	9,5	M5	15,4	11,1	0,0028
42	CD—44°11 909	11,2	M5	15,6	12,8	0,00058
43	CD—49°13 515	9,0	M3	15,6	10,6	0,0044
44	AO 17415-6	9,1	M4	15,8	10,7	0,004
45	Росс 780	10,2	M5	15,8	11,8	0,0014
46	Лаланд 25372	8,6	M1	15,9	10,2	0,0063
47	CC 658	11,0		16,0	12,5	0,0008
48	o² Эридана A	4,5	G5	16,3	6,0	0,3
49	o² Эридана B	9,2	A	16,3	10,7	0,004
50	o² Эридана C	11,0	M6	16,3	12,5	0,0008
51	70 Змеи A	4,2	K1	16,4	5,7	0,4
52	70 Змеи B	5,9	K5	16,4	7,4	0,083
53	Альтаир	0,9	A5	16,5	2,1	8,3
54	BD+43° 4305	10,2	M5	16,5	11,7	0,0016
55	AC+79° 3888	11,0	M5	16,6	12,5	0,0008

может быть принят, зависит от коэффициента направленности антенны и от скорости вращения планеты. Коэффициент направленности G можно выразить через ширину диаграммы направленности в градусах [4]:

$$G = \frac{27\,000}{\theta^2}\,. \tag{7}$$

Для случая меняющегося со временем G, величину θ можно заменить на $(\Delta\theta/\Delta t)\,\Delta t$:

$$G = \frac{27\,000}{[(\Delta\theta/\Delta t)\,\Delta t]^2}\,. \tag{8}$$

Здесь возникает вопрос о скорости вращения передающей планеты. Что касается ближайших соседей Земли, то Марс вращается с той же угловой скоростью, как и Земля, а скорость вращения Венеры до сих пор точно неизвестна [5]. Вообще говоря, представляется несколько странным совпадение периодов вращения Земли и Марса (24 *час*). Приняв это значение скорости, выразим (8) в децибелах:

$$G = 92 - 20\lg \Delta t. \tag{9}$$

На рис. 4 графически показана зависимость (8) максимального времени, в течение которого, как можно ожидать, передающая антенна направлена на Землю, от коэффициента направленности антенны. Предполагается, что период вращения планеты вокруг оси равен 24 *час* и что ось антенны лежит в плоскости экватора планеты.

Конечно, лучшим вариантом было бы постоянное сохранение ориентации передающей антенны в направлении Земли либо с помощью специальной системы стабилизации, либо благодаря ориентации луча антенны параллельно оси вращения планеты. Однако если бы такой случай имел место в действительности, то это могло бы быть либо чистой случайностью, либо результатом намеренного стремления к установлению контакта с обитателями солнечной системы. Так как последний вариант является достаточно невероятным, то наиболее реальным вариантом будет случай с ограниченным временем наблюдения.

Рис. 2—4 не дают особенной информации о возможностях космической связи с разумными существами, пока

не рассмотрены более детально требования к ширине полосы пропускания. Хотя этот вопрос достаточно сложен, но тем не менее на основе имеющегося опыта радиосвязи можно сделать некоторые общие заключения.

Вероятно, более удобной с точки зрения приема формой сигнала является монохроматическое излучение. Полоса пропускания, необходимая для приема, определяется

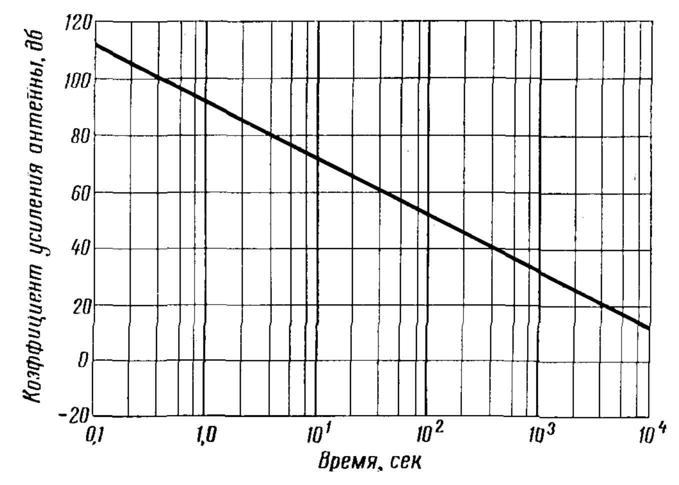


Рис. 4. Выходная мощность передатчика, работающего на расстоянии 10 световых лет, необходимая при использовании приемника с уровнем шумов 10° К.

в этом случае стабильностью передаваемого сигнала. При имеющихся на Земле высококачественных кварцевых генераторах очень стабильный генератор сантиметрового диапазона волн дает линию с шириной или с интервалом нестабильности 10 *гц*. Однако атомный стандарт частоты может обеспечить значительно более высокую стабильность, позволяя тем самым использовать еще более узкие полосы.

Хотя можно вести поиски монохроматического излучения высокой интенсивности, но вероятность приема искусственных сигналов можно увеличить, если перейти к поиску сигналов более сложной формы. Радиолокационные импульсы, частотно-модулированный сигнал,

телеметрия, телевидение, передача голоса, телеграфия или фототелеграф являются лишь немногими из существующих возможностей. К сожалению, многие из этих видов сигналов требуют значительно большей ширины полосы пропускания, чем мы пока располагаем. Однако в настоящее время развиваются новые методы приема, использование которых может привести к снижению требований на полосу для повторяющихся по форме сигналов, например радиолокационных импульсов [6]. Другое интересное направление развития радарной техники — сжатие импульсов. Но это требует, чтобы передатчик «знал», как это делать.

В общем виде проблема приема выглядит как поиск какой-либо негауссовой характеристики в принимаемом сигнале. Поиск можно осуществлять и по амплитуде, и по частоте, а также как в узкой, так и в широкой полосе приема. Метод фильтров может быть использован для методического поиска по целому ряду переменных величин с целью обнаружить негауссовы характеристики сигнала и выделить путем селекции этот сигнал. Чтобы облегчить эту задачу, можно промежуточную частоту приемника записывать на пленку, так что различные методы селекции могут быть применены к сигналу уже «вне схемы»; тем самым будет экономиться время радиотелескопа и будет сохраняться «документ» о сигнале, который был принят.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трудно предсказать, какого типа сигналы могут излучаться с некоторой планеты в галактических окрестностях Солнца. Но существуют веские соображения в пользу наличия жизни и, возможно, разумной жизни вблизи соседних звезд. Довольно вероятно, кроме того, что развитая цивилизация из спектра электромагнитных волн использует радиодиапазон. Маловероятно, чтобы какие-то разумные существа стремились установить связь с солнечной системой, хотя полностью эту возможность исключить нельзя. Более реальные перспективы имеет «подслушивание» возможных радиопередач.

Хотя некоторая возможность установления такой радиосвязи существует, вероятность успешного решения

этой проблемы быстро увеличивается по мере развития малошумящих приемных устройств, больших радиотелескопов и техники фильтров. Хотя отсутствие жизни в системе определенной звезды таким путем установить нельзя, мы имеем возможность установить наличие разумной жизни в одной или большем числе планетных систем. Так как сравнительно большое число звезд находится не далее 20 световых лет от Солнца, то можно надеяться на успешное решение проблемы поисков разумной жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Webb J. A., Telecommu. J. (Geneva) (March 1961).
2. Webb J. A., Astronaut. Sci. Rev. (Apr.— June 1960).
3. Briggs M. H., J. Brit. Interplanet. Soc. (March — Apr. 1959).
4. Reference Data for Radio Engineers, 4th ed., International Telephone and Telegraph Company.
5. Sci. Am. (July 1961).
6. Price R., Venus Radar Experiment, Rep. to AGARD, Sept. 1959.

Дж. Уэбб

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Полезно рассмотреть возможный характер сигнала из других планетных систем. Табл. 1 содержит список сигналов, которые можно искать с помощью приемных систем, создание которых на Земле станет возможным в ближайшем будущем. Противосамолетные радиолокационные системы (РЛС) не требуют особых пояснений, исключая то, что верхний предел в 100 *Мвт* для выходной мощности и длительность импульса 100 *мксек* являются оптимистическими оценками, так как не мощность и не длительность импульса, а горизонт ограничивают обычно дальность действия радара.

Противоракетные и спутниковые РЛС с длительностью импульса 1000 *мксек* и выходной мощностью 1000 *Мвт* теоретически возможно осуществить в настоящее время,

Таблица 1

Частота *кгц*	Длительность импульса	Выходная мощность, *Мвт*	Назначение
1—10	1—100 *мксек*	0,1—100	Обнаружение самолетов
0,1—2	100—1000 *мксек*	10—1000	Обнаружение ракет и спутников
0,1—10	0,1 *сек*	0,01—1000	Радар межпланетного прослушивания
1—10	Код или непрерывный сигнал	0,01—100	Связь в космическом пространстве

использовав фазированные многоэлементные антенны и несколько когерентных передатчиков. Сейчас РЛС дальнего обнаружения имеют мощность лишь на порядок меньше этой величины.

Такая РЛС, возможно, потребовалась бы развитой цивилизации для поиска и слежения за различными объектами в окрестностях планеты либо с целью обороны, либо с целью научных исследований; можно ожидать, что она обладала бы высокой выходной мощностью и очень большой длительностью импульса излучения.

Несомненно, у высокоразвитой цивилизации должна возникнуть потребность в осуществлении межпланетной связи в пределах ее планетной системы. Передатчик с таким назначением должен иметь высокий уровень выходной мощности, излучать кодированный либо (монохроматический) модулированный сигнал и работать на антенну с относительно высоким коэффициентом направленного действия.

С помощью рис. 2 (стр. 200) найдем, что для того, чтобы с помощью приемника с температурой шумов 10° K и приемной антенны диаметром 100 футов получить отношение сигнала к шуму, равное единице, для одного импульса длительностью 1000 *мксек* (полоса 1 *кгц*) на

расстоянии 10 световых лет, потребовалось бы иметь произведение мощности передатчика на коэффициент направленности антенны величиной 140 *дб·вт*. Этому условию удовлетворяет система с передатчиком мощностью 1000 *Мвт* и с антенной, коэффициент направленности которой равен 50 *дб*. Вероятность приема такого сигнала, если она и существует, очень мала.

В этой связи отметим один очень интересный момент. Допустим, что радиотелескоп следит за «подозрительной» звездой непрерывно в течение более или менее длительного промежутка времени, например несколько недель. Существует некоторая вероятность, что как раз за это время произойдет маловероятное событие. Если это событие уже произошло, то почти наверняка более интенсивный поиск приведет к более определенным выводам относительно реальности и характеристик сигнала.

Отношение сигнал/шум, конечно, не обеспечивает достаточно уверенного приема одного импульса сигнала, но вероятность приема можно увеличить наблюдением многих импульсов. При приеме монохроматического сигнала дело хотя и обстоит несколько по-другому, но основные положения о вероятности приема можно применить и в этом случае.

Для осуществления поиска сигнала неизвестного характера требуется применение специальных фильтров. Эта методика связана с долгими тщательными поисками сигнала на фоне шумов. По-видимому, лучшим способом усовершенствования всей процедуры является запись «шумов» на широкополосную ленту и последующий анализ сигнала с помощью вычислительной машины с целью найти присутствие негауссова сигнала. Можно создать дополнительные фильтры для применения к шуму различных «критериев случайности» и для подсчета вероятностных характеристик принимаемого негауссова сигнала.

Принимая во внимание наш вывод о том, что вероятность приема сигнала от цивилизации, стоящей на нашем уровне развития и удаленной на 10 световых лет, с помощью 100-футового телескопа с шумовой температурой 10° K, вообще говоря, мала, следует признать целесообразным поиск сигнала, который может оказаться удачным. Использование телескопов большего диаметра значительно увеличивает вероятность приема сигналов других цивилизаций по двум причинам. Во-первых, они позволяют проводить более тщательный поиск сигналов от звезд — наших ближайших соседей, и, во-вторых, обеспечивают изучение большего числа звезд. Например, наш ближайший (звездный) сосед находится на расстоянии 4,29 светового года, а в сфере радиусом 16,6 светового года содержится уже 55 звезд.

В космосе или даже на поверхности Земли может оказаться возможным в течение нескольких ближайших десятилетий создать радиотелескопы диаметром от 1000 до 10 000 футов. Эти телескопы были бы очень полезны для изучения естественного радиоизлучения разных областей Галактики, и их строительство было бы оправдано одной только этой задачей. Использование столь мощных инструментов почти наверняка обеспечит успешный прием разумных сигналов от цивилизаций, сравнимых с нашей по уровню развития и находящихся на расстояниях десятка световых лет. Такие поиски проводились бы, вероятно, по ленте, на которой записан сигнал, с тщательной обработкой и контролем возможных ошибок. Такой метод способствует также более экономному использованию больших радиотелескопов, рабочее время которых (в особенности для очень больших телескопов) будет цениться очень высоко.

Предоставим астрономам и биологам судить о вероятности существования жизни в других звездных системах. Однако как инженер-связист, я чувствую, что технически возможно исследовать «нашу» ветвь Галактики с целью поисков разумных радиопередач, и если они будут обнаружены, принять эти сигналы и определить их характер. Для меня это очень волнующая возможность, так как только она поддерживает надежду на то, что в течение жизни некоторым из нас удастся заглянуть в жизнь каких-то других разумных существ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hall W. H., Proc. I. R. E., 44, 224 (1956).

19 КОГЕРЕНТНОСТЬ РАЗУМНЫХ СИГНАЛОВ

О КОГЕРЕНТНОСТИ И УЗКОПОЛОСНОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, МАЗЕРОВ И ЛАЗЕРОВ

В некоторых дискуссиях с инженерами и физиками по вопросу о распространении способов генерации когерентного излучения в область более коротких волн мы отмечали, что узкополосность генерируемого излучения если и не отождествляется с когерентностью [1]) этого излучения, то часто рассматривается как мера степени когерентности. Следует отметить, что когерентность есть понятие не количественное, а качественное: либо излучение когерентно, либо нет, независимо от соображений, связанных с шириной полосы. Если длительность сигнала неопределенна по физическим причинам, таким, как нагревание рубина в лазере или генератора подкачки, то вопрос сводится к тому, когерентно ли излучение за время испускания или нет.

Для понимания рассматриваемого явления полезны мысленные эксперименты, реальное осуществление которых станет, по-видимому, возможным несколько позднее.

Рассмотрим источник узкополосного излучения, который необходимо испытать на когерентность, и обозначим его приблизительную центральную частоту через f. Если выходной сигнал источника смешивается с двумя сигналами, предполагаемыми совершенно монохроматическими

[1]) Термин «когерентность» используется здесь применительно к непрерывному излучению, которое интерферирует само с собой при задержке на любую величину во времени. Ее не следует смешивать с когерентностью в оптике, которая характеризует способность к интерференции двух пучков света от общего источника.

и пропорциональными $\cos 2\pi ft$ и $\sin 2\pi ft$ соответственно, получаются две компоненты фазового вектора.

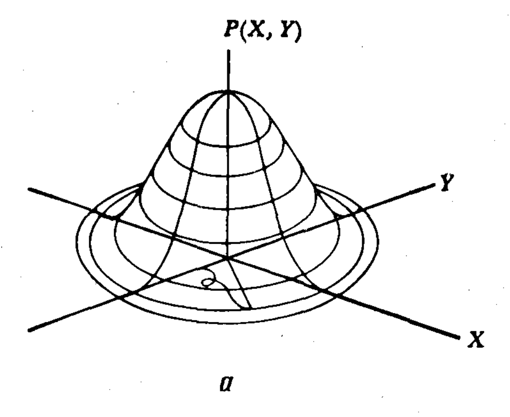
Поведение этой пары напряжений будет критерием когерентности или некогерентности исследуемого излучения.

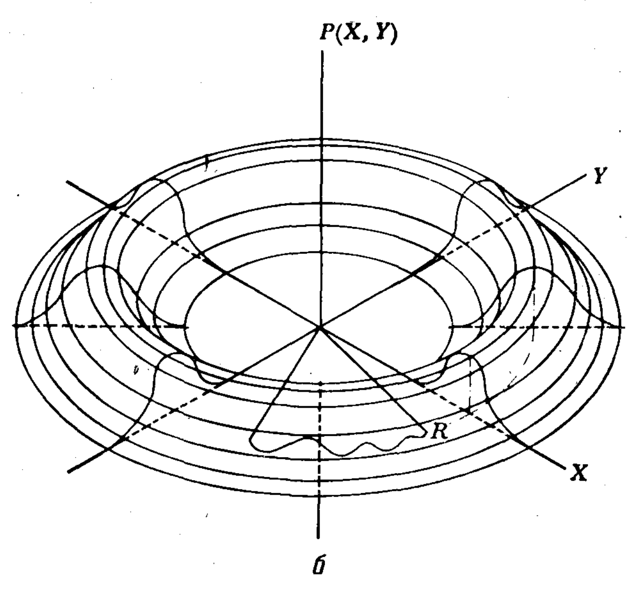
Если это излучение некогерентно, то конец вектора будет совершать двумерное случайное движение со скоростью, обратно пропорциональной ширине полосы частот, и если эксперимент продолжается достаточно долго, возможно статистическое описание положения конца этого вектора при помощи распределения вероятностей, которое в большинстве случаев будет представлять собой гауссов «холм» с центром в начале координат (рис. 1, *а*). На случайное движение конца вектора накладывается еще круговое вращение, скорость которого пропорциональна отклонению f от точной центральной частоты.

С другой стороны, если исследуемое излучение когерентно, то фазовый вектор будет совершать случайное движение, статистически описываемое распределением вероятностей, которое в большинстве случаев будет представлять собой тороид с сечением в виде гауссоиды и с бесконечно малой плотностью вероятности в центре кольца — начале координат (рис. 1, *б*). Радиальные отклонения конца фазового вектора от центральной окружности тороида подобны колебаниям около нуля теплового напряжения на конденсаторе, шунтированном сопротивлением, так как регенеративные свойства будут иметь тенденцию поддерживать постоянной среднюю длину фазового вектора. Наоборот, движения конца вектора по окружности будут носить случайный характер; скорость этих движений была вычислена в работе [1]. На это случайное движение по окружности накладывается медленное среднее вращение, скорость которого пропорциональна отклонению f от точной центральной частоты спектра источника.

Важно отметить, что нет никакого опорного по фазе сигнала, к которому можно было бы привязать фазовый вектор с помощью сигнала ошибки, пропорционального отклонению вектора от этой опорной фазы. Таким образом, не существует распределения вероятностей фазового вектора, описываемого «холмом» вне начала координат (рис. 2).

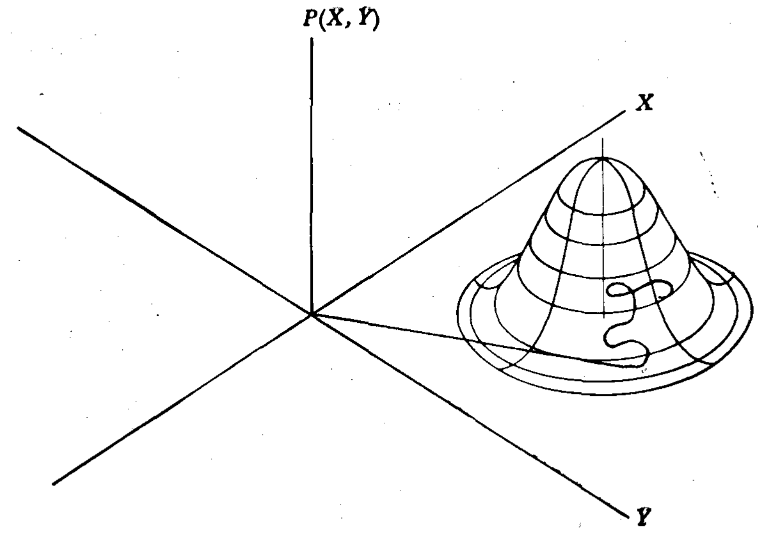
Экспериментальная проверка поведения фазового вектора для выходных сигналов лазеров не проводилась,





Р и с. 1. Распределение вероятностей фазового вектора представляющее соотношение между узкополосным сигналом и монохроматическим сигналом сравнения в двух случаях.
а — сигнал некогерентный; распределение представляет *собой гауссов «холм» с центром в начале координат* без предпочтительного значения амплитуды.
б — сигнал когерентный. Тороидальное распределение показывает, что среднее значение амплитуды равно *R*, но могут происходить случайные изменения фазы.

но можно представить, что когда излучение двух относительно стабильных лазеров интерферирует на двух фотоэлементах (при относительной задержке двух лучей на четверть волны), то выходные напряжения фотоэлементов



Р и с. 2. Показанное на рисунке распределение вероятностей в пределе, когда время наблюдения стремится к бесконечности, является невозможным, поскольку это означало бы наличие синхронизации по фазе с гипотетическим опорным сигналом.

образуют фазовый вектор, фаза которого есть разность фаз сигналов двух лазеров. Возможность измерения в таком эксперименте распределения вероятностей положений конца фазового вектора зависит от соотношения между шириной полосы выходов фотоэлементов и мгновенной разностью частот двух лазеров.

О ВОЗМОЖНОМ ХАРАКТЕРЕ РАЗУМНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ИЗ ДРУГИХ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

В настоящее время планируются эксперименты [2] по приему радиосигналов с планет других солнечных систем. Мало кто верит в успех этих экспериментов, но и мало кто возражает против попыток их осуществления.

Спектр, а также характер этих предполагаемых сигналов составляют интересный предмет для различных размышлений.

Можно предположить, что спектральное положение этих гипотетических сигналов будет каким-либо простым образом связано с линией нейтрального водорода 1420 *Мгц*, а так как эта линия находится в относительно «шумной» области космического радиоспектра, то возможно положение сигнала в интервале частот от половины до удвоенной частоты линии водорода.

Можно думать также, что эти сигналы будут содержать когерентный компонент в интервале от половины до удвоенной частоты линии водорода, насколько позволяет современная точность. Руководствуясь этими соображениями, следует ожидать, что частота передатчика исправлена за скорость движения в направлении излучения относительно центра масс его планетной системы, а также за гравитационный потенциал в точке передачи; эти же поправки мы должны будем сделать для нашего приемника.

Даже после этих поправок, когерентный сигнал должен быть исправлен еще и за красное смещение между двумя планетными системами, если, конечно, это не сделано при передаче. Таким образом, могут быть четыре возможных области спектра, в которых следует искать когерентные сигналы: на вдвое меньшей или вдвое большей частоте по сравнению с частотой линии водорода и с поправкой за красное смещение или без нее.

Протяженность диапазона поиска по частоте будет определяться главным образом неуверенностью нашего (или их) значения красного смещения и в меньшей степени — относительной ошибкой при передаче и приеме в определении точной частоты линии и различных поправок, упомянутых выше. Необходимо отметить, что два интервала поисков на частоте, равной половине частоты линии, составляют в 4 раза меньше, чем два интервала на удвоенной частоте линии, и что этот фактор 4 в точности компенсируется в 4 раза меньшей направленностью рефлектора данного размера на более низкой частоте. При учете таких факторов, как генерация необходимой мощности с возможно меньшими затратами и большее перекрытие пространства, предпочтительнее оказываются два интервала вблизи $^1/_2$ частоты линии.

О величине полосы поиска Δf в каждом интервале можно лишь строить предположение, но как только полоса выбрана, метод поиска определяется сразу. Принятый сигнал гетеродинируется с $\cos 2\pi ft$ и $\sin 2\pi ft$ соответственно, где f означает частоту, заключенную в интервале поиска, и оба выхода пропускаются через RC-фильтры низких частот с постоянной времени порядка

$$RC = \frac{1}{\pi\Delta f}\ .$$

Выходные напряжения фильтров образуют фазовый вектор, поведение конца которого изучается в течение времени, в несколько раз превосходящего постоянную времени фильтров. Если распределение вероятностей обнаруживает тенденцию к форме, изображенной на рис. 1, *б*, и если эта тенденция подтверждается при увеличении времени наблюдения, вывод о наличии сигнала от разумных существ в интервале частот $f \pm \Delta f/2$ будет зависеть от ошибки, которая экспоненциально уменьшается со временем.

Так как при данной мощности передачи полоса поиска обратно пропорциональна квадрату расстояния, а время поиска обратно пропорционально квадрату Δf, то получается зависимость четвертой степени между временем поиска и расстоянием; это обстоятельство требует одновременного поиска в нескольких частотных интервалах шириной Δf, с тем чтобы выполнить поиск в разумные сроки.

Интересно отметить основное различие между описанной выше процедурой поиска и процедурой, состоящей в исследовании узкого спектрального участка, образовании автокорреляционной функции записанных сигналов и фурье-преобразовании этой автокорреляционной функции через косинусы. Этот последний метод служит для обнаружения избыточной спектральной плотности в узкой полосе, но не сохраняет фазовую информацию. Поэтому когерентный сигнал, слабо модулированный по фазе, становится неотличим от спектральной линии с шириной, равной уходам частоты, в то время как «трековый»

характер статистического распределения положений конца фазового вектора, который может быть обнаружен вышеописанным способом, позволяет с все возрастающей уверенностью установить, что когерентные сигналы действительно когерентны.

ДОБАВЛЕНИЕ

Путаница по вопросу о когерентности объясняется, по-видимому, различием точек зрения оптиков и инженеров-связистов, которых появление лазеров заставило искать «общий язык» по этой проблеме.

С точки зрения оптики я определил когерентность как преимущественно качественную характеристику непрерывного сигнала по сравнению с излучением в оптической линии или с отфильтрованным в узкой полосе белым шумом [3], так как оптик считает, что имеет дело с когерентным источником света, когда он наблюдает четкую картину интерференции двух лучей, даже если эта картина нестационарна. Причина состоит в том, что в прошлом оптик назвал когерентными два интерферирующих луча света от одного источника, задержанных по времени друг относительно друга на конечную величину. С другой стороны, инженер-связист, давно знакомый с непрерывными сигналами, считает само собой разумеющейся возможность интерференции двух частей одного сигнала, задержанных друг относительно друга на любое время, и возможно, предпочтет сохранить термин «когерентность» для обозначения какого-либо свойства источника сигнала, например степени стационарности интерференционной картины или фазового вектора двух фазовых частей.

Здесь инженер подходит к интересному кругу проблем. Например, если его источник представляет собой идеальный генератор, работающий в непрерывном режиме и установленный на астероиде, он будет пытаться следить за слабым сигналом, который он принимает с помощью фоточувствительной системы и поведение которого можно описать дифференциальным уравнением демпфированной системы, например

$$\left(1+T\frac{d}{dt}\right)^n \varphi_s=\varphi_r,$$

где φ_s и φ_r — фазы принятого и местного сигналов, а n и T выбраны из соображения оптимизации отношения сигнала к шуму.

Так как большое T означает очень узкую полосу приема, T можно считать мерой когерентности принятого сигнала, даже если имеет место быстрое вращение фазового вектора интерференции, образованного двумя частями сигнала, задержанными друг относительно друга. Далее, следует учитывать порядок n характеристического дифференциального уравнения, который может привести к представлению, что «когерентность» есть многоразмерное количественное понятие.

Сформулированная выше концепция когерентности тоже вызывает ряд вопросов. Например, следует ли называть частично когерентными сигналы, которые характеризуются «трековым» распределением фазового вектора, несколько искаженным в верхней части, и является ли ввиду всего этого когерентность, как ее определил бы оптик, количественным понятием?

ЛИТЕРАТУРА

1. Golay M. J. E., Proc. I. R. E., 48, 1473 (1960).
2. Struve O., Phys. Joday, 13, 18 (1960).
3. Golay M. J. E., Proc. I. R. E., 49, 958 (1961).

20 РАДИОСИГНАЛЫ С ДРУГИХ ПЛАНЕТ

Вряд ли можно сказать, что линия водорода на частоте 1420 *Мгц* расположена в «шумном» участке радиоспектра [1]. Средняя яркостная температура неба составляет несколько градусов Кельвина. Только в очень ограниченных участках неба — в направлении на центр Галактики и по обе стороны галактического экватора — температура несколько выше и достигает 50° K и более в зависимости от размеров антенны. На удвоенной длине волны эти температуры в 6—7 раз выше. Кроме этого непрерывного спектра, есть еще излучение в линии, вообще довольно близкое к номинальной частоте линии, но также сильно концентрирующееся к галактической плоскости.

Однако планеты, с которых можно ожидать сигналов, не должны быть удалены настолько, чтобы лежать лишь в плоскости Галактики [2], и поэтому нашему случаю больше соответствуют низкие яркостные температуры холодных областей неба. В настоящее время шумы приемной системы и окружающего пространства более существенны, чем космические шумы. Поэтому не делалось попыток перейти от 1420 *Мгц* к другой частоте. Однако имеются соображения [2] против использования 1420 *Мгц* или других частот СВЧ-диапазона в том случае, если расстояние до ближайшей цивилизации, стоящей на более высокой ступени развития по сравнению с нами, составляет около 100, а не 10 световых лет (последние расстояния исследовались в проекте «Озма»).

В условиях, когда сигнализация при помощи радиоволн представляется разумной, вряд ли целесообразно исправлять различные допплеровские смещения. Излучающий передатчик, неподвижный относительно поверхности далекой планеты, позволил бы нам определить длину дня и года, радиус и наклонение планетной орбиты, радиус планеты, широту передатчика и даже другие параметры. В качестве первых данных, пока сигнал еще не расшифрован, эти сведения будут намного более интересными, чем набор чисел. Последние же докажут только, что наши абоненты, спроектировавшие мощный передатчик, умеют считать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Golay M. J. E., Pros. I. R. E., 49, 959 (1951).
2. Brazewel R. N., Natyre, **186**, 670 (1960).

Су-Шу Хуанг

21 ПРОБЛЕМА ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СВЯЗИ

Вообще говоря, связь — двухсторонний процесс, и межзвездная связь не должна быть исключением. Если все будут пытаться принять сигналы от других существ, не посылая своих собственных, то никто не примет сигнала. На самом деле вопрос еще глубже. Если даже кто-то ведет передачу, мы не сможем получить полной информации, если не прибегнем к помощи передатчика, сигнал которого способен достигнуть планеты, на которой живут наши абоненты. Это видно из следующих рассуждений.

Пусть общее число передающих станций, предназначенных для межзвездной связи, равно N_t, а общее число приемных станций, которые используются исключительно для космической связи на межзвездных расстояниях, равно N_r. Если обозначить через N_s^0 количество заключенных в единице объема звезд, близ которых вероятность существования развитых форм жизни достаточно высока, то полное число таких звезд будет

$$N_s = \frac{4\pi}{3} N_s^0 R^3, \qquad (1)$$

где R — расстояние, которое эти цивилизации *считают для себя доступным* при существующих у них параметрах приемной и передающей аппаратуры. Руководствуясь подсчетами звезд в окрестностях Солнца [1] и критерием пригодности для жизни вблизи звезд условий [2], можно ожидать, что $N_s^0 = 0{,}006$, если R выражено в парсеках.

Рассмотрим поведение R. Очевидно, что R быстро растет по мере технического прогресса, поскольку в результате развития техники совершенствуется каждый этап процесса передачи и приема сигналов (увеличивается мощность передатчика, диаметр передающей антенны и антенны радиотелескопа, чувствительность приемника и т. д.). Вынося телескоп за пределы земной атмосферы, мы также получаем выигрыш за счет уменьшения шумов.

Наш «земной» опыт свидетельствует, что технический прогресс в области радиосвязи идет очень быстро. Следовательно, наиболее вероятно, что любая цивилизация, существующая в настоящее время в Галактике, либо совершенно неспособна поддерживать радиосвязь, либо находится на стадии «технического совершенства», а именно: «Ограничения на чувствительность систем связи накладываются не недостатками аппаратуры, как, например, шумы приемника, а естественными явлениями, над которыми человек не властен» [3]. Для случая нашей цивилизации переход от изобретения радио до стадии технического совершенства может занять 100 лет. По сравнению с масштабами времени, которые мы имеем в виду, этот интервал пренебрежимо мал. В соответствии с этим можно написать

$$R = \begin{cases} 0 & \text{при} \quad t < t_0, \\ R_p & \text{при} \quad t > t_0, \end{cases} \qquad (2)$$

где t_0 — момент времени, когда происходит указанный переход (ввиду кратковременности такого перехода весь этот промежуток времени можно принять за точку t_0 на оси времени). Величину R_p можно считать практически постоянной для всех цивилизаций, достигших стадии технического совершенства в радиосвязи. Наша собственная цивилизация, находящаяся на переходной стадии к техническому совершенству, может, по-видимому, обеспечить $R = 5$ *парсек* [3, 4]. Поэтому предположение, что R *может* превысить 500 или 1000 *парсек*, не выходит за пределы разумных допущений.

Следует отметить, что интерес к установлению контактов с другими цивилизациями в Галактике падает с ростом R, так как распространение сигналов от одной цивилизации к другой занимает все больше и больше времени.

Скажем, при $R = 1000$ *парсек* однократный обмен информацией займет 6600 лет, т. е. время порядка всей исторической эры человечества.

Для дальнейших оценок мы примем значение $R = 500$ *парсек*. Тогда из (1) следует, что $N_s = 3 \cdot 10^6$. Нам неизвестно среднее полное число N_t передающих станций, которыми располагает каждая цивилизация. Но оно не может быть большим, так как создание таких станций обходится дорого и, что более важно, их работа не сулит никаких непосредственных результатов. Любой результат, полученный при приеме межзвездных сигналов, всегда дает нечто определенное. Но тот, кто передает сигналы, долгие годы не может судить ни об успехе, ни о неудаче своих передач. Более того, если прием космических сигналов, посылаемых другими разумными существами, привлекателен с научной точки зрения, так как представляет собой процесс поисков неизвестного, то передаче сигналов в межзвездное пространство совершенно не свойственно очарование поиска неизведанного. Но если ученые не берутся за эту проблему ввиду отсутствия привлекательности, то кто же еще будет осуществлять проект, требующий больших средств в течение тысячелетий? На Земле уже начато исполнение проекта «Озма» [3] по поиску искусственных сигналов из других миров, но мы еще не посылаем своих сигналов.

Во всяком случае, разумно считать, что число специальных передатчиков для космической связи у каждой цивилизации не может быть большим. Таким образом, можно написать следующие неравенства:

$$N_s \gg N_r > N_t, \tag{3}$$

причем N_s/N_t имеет величину порядка 10^6, если взять $R = 500$ *парсек*; другими словами, мы ожидаем, что N_t меньше 10. Большая величина отношения N_s/N_t сразу ставит дилемму перед разумными существами, ведущими передачу. Очевидно, что они не могут направить всю энергию лишь к одной звезде. Единственный путь, на котором у нас будут шансы установить связь с другими цивилизациями, состоит в том, чтобы направлять сигналы последовательно ко всем звездам, которые находятся в пределах досягаемости и вблизи которых можно ожидать существования

высших форм жизни. Таким образом, если они тратят в среднем один день на каждую звезду, то «вызов» всех предполагаемых «абонентов» займет около 300 лет, если принять $N_s/N_t = 10^6$ и если луч достаточно узок.

Естественно ожидать, что если разумные существа на какой-то планете ведут вообще передачи космических сигналов, то они должны разделить свои передачи на два вида: 1) «зондирующие» передачи, которые рассчитаны на их обнаружение и установление контакта; 2) информационные передачи, которые адресуются лишь тем, кто ответил на сигналы. Такое разделение передач необходимо и неизбежно, так как они не могут тратить время на «разговоры» с молчащими цивилизациями. Следовательно, чтобы принять действительно важные сигналы, мы должны быть готовы послать на них какой-то ответ. Отсюда следует также, что мы должны быть готовы ждать в течение некоторого времени (зависящего от их удаленности от нас) до тех пор, пока мы сможем принять важные информационные передачи, даже если мы пошлем ответный сигнал немедленно после приема их «зондирующих» передач.

Они могут и не делить время работы передающих антенн поровну между всеми звездами, вблизи которых они предполагают наличие разумной жизни. Напротив, они могли бы посылать сигналы к близким звездам чаще, чем к далеким, поскольку для получения ответа от первых требуется меньше времени. В связи с этим эффективный путь посылки сигналов к близким звездам состоит в распределении рабочего времени таким образом, чтобы время между двумя последовательными сеансами передач было порядка $2r/c$, где r — расстояние до звезды, а c — скорость света. Это можно назвать «допросом с пристрастием», так как определенный таким образом интервал времени как раз достаточен для того, чтобы сигналы достигли абонента и ответ вернулся назад. Согласно этой схеме, звезда, находящаяся на расстоянии 5 световых лет, «вызывается» в течение коротких интервалов времени (скажем, одного дня, как в предыдущем примере) каждые 10 лет. Следовательно, время, уделяемое более близким звездам, значительно увеличивается, и если в окрестности близкой звезды действительно существует техно-

логически развитая цивилизация, то такой режим проведения передач явно увеличивает шансы на установление космической связи. В этом случае поиски сигналов от близких к нам звезд, проводимые по проекту «Озма», имеют наибольшие шансы на успех. С другой стороны, более частые передачи сигналов по направлению к близким звездам проводятся за счет уменьшения времени для далеких звезд, так как полное время передач ограничено. Поэтому при описанном режиме передач уменьшается вероятность приема сигналов более далекими цивилизациями.

Короче говоря, если среднее расстояние друг от друга двух одновременно существующих в Галактике цивилизаций меньше некоторой величины, скажем 10 *парсек*, то неравное распределение времени передач имеет известное преимущество. Но если среднее расстояние больше некоторого значения, скажем 100 *парсек*, то подобная система передач имеет недостатки. A priori мы не знаем, какая из двух возможностей имеет место в действительности. Поскольку наш уровень технического развития, вообще говоря, ниже, чем у других цивилизаций, которые могут установить с нами контакт [5], мы можем не делать выбора и вообще не посылать «зондирующих» сигналов. Наша передающая станция будет использоваться только (по крайней мере в течение ближайших 100 лет) для ответов на искусственные сигналы из межзвездного пространства.

Краткость интервала времени, в течение которого существа других миров посылают в нашу сторону сигналы при каждом сеансе, тоже затрудняет обнаружение и отождествление сигналов. Возвратимся к нашему численному примеру, согласно которому сигналы посылаются в нашу сторону в течение одного дня каждые 300 лет; мы можем оказаться не в состоянии правильно понять факт приема сигналов, потому что при последующих наблюдениях мы не обнаружим сигналов в течение 300 лет. Здесь мы еще раз убеждаемся в необходимости иметь собственную передающую станцию для более успешного поиска космических сигналов. Если есть основания считать, что какой-то сигнал приходит к нам от разумных существ вблизи некоторой звезды, то мы могли бы немедленно послать им

ответные сигналы. Любая цивилизация, способная вести передачу сигналов, наверняка будет вести и поиск ответных сигналов с «вызванной» ранее звезды по истечении промежутка времени, которое занимает распространение сигнала к «вызываемой» звезде и обратно.

Возможно, что некоторые разумные существа могут посылать сигналы к выбранной ими звезде в течение более длительных интервалов времени, например порядка 1 года. В этом случае будет легче изучить природу источника сигналов. Однако потом мы должны будем ждать следующей передачи в течение 10^6 лет, если была пропущена предыдущая. Если бы мы располагали возможностью вести такие передачи, то вряд ли взялись бы за цикл передач, который завершится лишь через 10^6 лет. Наиболее вероятный режим передачи — это «вызов» звезды в течение времени, даже более короткого, чем 1 сутки. Оптимальная длительность сеансов передачи должна быть достаточной для выделения сигнала на фоне шумов при их приеме. Следовательно, для более далеких звезд длительность передающих сеансов должна быть больше, так как выделение из шумов более слабого сигнала требует больше времени.

Во всяком случае, вероятность, что мы обнаружим сигналы, которые действительно передаются какой-то цивилизацией, равна в среднем N_t/N_s, что для сферы радиусом 500 *парсек* составляет 10^{-6}. Основная трудность, обусловленная большим различием N_t и N_s, не является новостью для астрономов. Фактически с ней сталкиваются при всех астрономических наблюдениях. Показателен следующий пример: полное число звезд в Галактике около 10^{11}, в то время как астрономов на всем земном шаре насчитывается около 10^4, а телескопов, используемых каждую ночь для астрономических исследований, около 10^2. Естественно сделать вывод, что нельзя требовать от астрономов, чтобы они исследовали каждую звезду в Галактике — даже без учета того факта, что большинство звезд слишком слабы, чтобы быть наблюдаемыми.

С другой стороны, для установления космической связи на межзвездных расстояниях необходимо наводить передающие антенны на все звезды, вблизи которых возможны высокоразвитые формы жизни. Современный уровень развития науки позволяет утверждать, что

возникновение жизни и разумной жизни — это естественное космическое событие, подобное, скажем, образованию звезд, если физические условия оказываются подходящими для их развития [6]. В итоге можно заключить, что успех попыток установить межзвездную связь может решающим образом зависеть от проблемы «обзора» большого числа звезд при ограниченных возможностях передачи и приема.

ЛИТЕРАТУРА

1. van de Kamp P., Publ. Astron. Soc. Pacific, **65**, 73 (1953).
2. Huang S.-S., Am. Scientist, **47**, 397 (1959).
3. Drake F. D., Sky and Telescope, **19**, 140 (1960).
4. Cocconi G., Morrison P., Nature, **184**, 844 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 177—182.)
5. Morrison P., Bull. Phyl. Soc. Wash., **16**, 58 (1962).
6. Материалы дискуссии на Конференции по космической связи в Грин Бэнк.

Б. Оливер

22 НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАЗЕРОВ

Вскоре после разработки Таунсом, Бломбергеном и другими микроволнового мазера стало ясно, что те же самые принципы можно положить в основу генерации гораздо более высоких частот. В своей исторической статье в журнале «Physical Review» от 15 декабря 1958 г., озаглавленной «Инфракрасные и оптические мазеры», Шавлов и Таунс предсказали возможность распространения принципов мазера на оптическую область, описали общие черты необходимых устройств и высказали соображения о возможном способе их действия. Очень немногие открытия последних лет поразили воображение столь большого числа ученых и инженеров, как оптический мазер, или лазер.

Причина заключается в том, что это устройство впервые дало возможность получения и усиления когерентного света, тем самым открыв оптический диапазон для применения в нем всех методов, используемых сейчас в радиодиапазоне.

В июле 1960 г. Майман [1] объявил о первой успешной генерации когерентного света в импульсной форме, применив рубин с оптической накачкой.

В начале 1961 г. Джэвен, Беннет и Герриот объявили об успешной работе в непрерывном режиме газовых оптических мазеров [2]. Кроме этого, во многих других лабораториях проводилась большая работа в этой же области во все увеличивающихся масштабах.

Основные принципы оптического мазера те же, что и микроволнового мазера. На рис. 1 в схематической форме показаны основные детали оптического мазера. Во-первых, необходим резонатор. В оптическом мазере он образован двумя точно ориентированными зеркалами, одно из которых немного прозрачно. Можно показать,

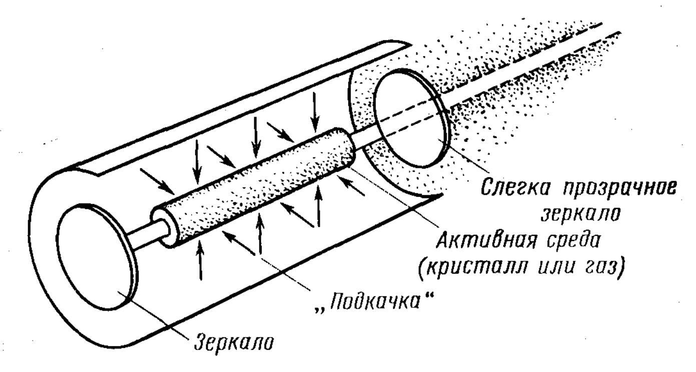


Рис. 1. Элементы оптического мазера.

что между этими зеркалами могут существовать такие виды резонансных колебаний, частота которых соответствует целому числу полуволн в промежутке между зеркалами. В этом промежутке помещена активная среда, которая может быть либо газом, либо кристаллом с включениями некоторых атомов (в рубине это атомы хрома). Среда должна обладать двумя квантовыми состояниями, разделенными энергией, соответствующей желаемой частоте; должна быть возможность перенаселения верхнего состояния по отношению к нижнему. Это достигается с помощью «накачки» атомов в основном состоянии на верхние энергетические уровни электрическим или оптическим путем. С этих высоких энергетических уровней атомы обычно переходят без излучения на верхний из двух энергетических уровней, соответствующих желаемому переходу. С верхнего уровня некоторые атомы будут спонтанно переходить на нижний и излучать свет, как в любой газоразрядной трубке. Свет, обусловленный спонтанным излучением, будет некогерентным и излучается хаотически во всех направлениях. Однако в присутствии резонатора часть этого спонтанного излучения будет возбуждать один из типов резонансных колебаний камеры, и поле, связанное с этим резонансом, будет индуцировать в среде излучение. Это индуцированное излучение по фазе когерентно с полем, которое его индуцирует; если взаимодействие достаточно сильное, то образуется когерентная

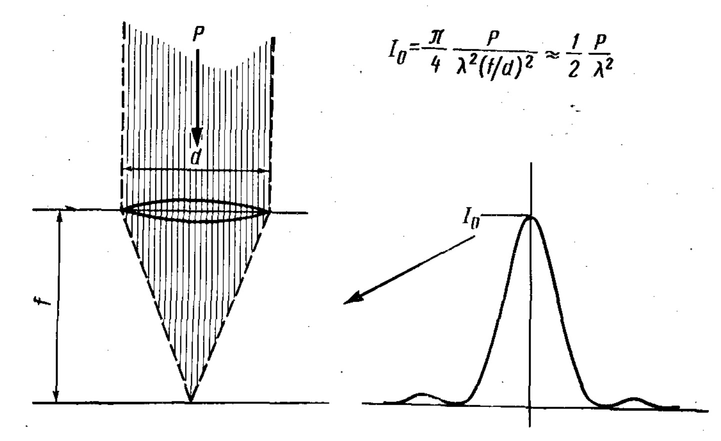


Рис. 2. Фокусирование когерентного света.

электромагнитная волна, соответствующая одному из типов колебаний резонатора. Часть энергии будет уходить через полупрозрачное зеркало, образующее одну из сторон резонатора, в виде четкого луча когерентного света (рис. 2). Существенным является то, что этот луч света представляет собой плоскую когерентную электромагнитную волну — такую же, как получается в радиопередатчике, но гораздо более высокой частоты.

Следует различать два аспекта когерентности: пространственную и временнýю. Волна является *пространственно* когерентной, если имеются поверхности, на которых амплитуды волны в функции времени сильно связаны между собой. Если когерентность полная, корреляция равна единице, и напряженность в одной точке будет пропорциональна напряженности в других точках поверхности. В качестве примера пространственной когерентности рассмотрим напряженность в любых двух точках на фронте

волны света от далекой звезды. В этих точках напряженность является одной и той же функцией времени и аналогично напряженность вдоль разных лучей является одной и той же функцией расстояния.

Волна обладает *временнóй* когерентностью в том случае, если существует корреляция между амплитудой волны в какой-либо точке в данное время и в некоторый более поздний момент времени. Полной временнóй когерентностью обладает излучение одной частоты; то же самое относится к любой комбинации частот.

При хаотической модуляции спектральные линии расширяются и временнáя когерентность уменьшается; в пределе, когда спектр волны состоит из непрерывного распределения частот, как, например, в случае излучения идеального черного тела, временнáя когерентность полностью исчезает. Таким образом, чистота спектра (т. е. степень близости спектра к линии) является мерой временнóй когерентности.

Для уяснения разницы между когерентным и некогерентным излучением может быть полезной следующая аналогия. Некогерентное излучение можно представить как трехмерную аналогию волн на поверхности плавательного бассейна в момент, когда его только что покинули пловцы. Волны различной длины бегут хаотически во всех направлениях, и корреляция между функциями времени, представляющими амплитуды в двух удаленных друг от друга точках, очень мала. Если бы вокруг бассейна была спокойная вода на том же уровне, то при быстром удалении стенок возмущение распространялось бы во всех направлениях подобно излучению некогерентного света. В противоположность этому, если поверхность первоначально спокойного бассейна привести в движение, равномерно качая закрепленный с одной стороны плот, то образуется последовательность плоских волн. Эти волны будут обладать высокой степенью пространственной когерентности, так как амплитуды их в зависимости от времени будут сильно коррелированы в различных точках. Если движение плота периодическое, то волны будут обладать также временнóй когерентностью. Если опять убрать стенки, волна побежит в виде луча перпендикулярно плоту; в случае если длина волны

меньше длины плота, луч будет очень мало расходиться на большом расстоянии.

Рубиновые лазеры работают в импульсном режиме и дают достаточно большую пиковую мощность. Обычно получаются импульсы мощностью порядка 10 *квт* и длительностью порядка 1 *мсек*. Следовательно, полная энергия импульса составляет около 10 *дж*. Несмотря на то что спектральная линия достаточно сужается благодаря мазерному эффекту, в рубиновом лазере временнáя когерентность все еще сравнительно невелика. Типичной является ширина линии порядка 1000 *Мгц*. Пространственная когерентность также весьма далека от идеала, что, по-видимому, вызвано оптическим несовершенством самих рубиновых кристаллов. Обнадеживает тот факт, что эти дефекты могут быть устранены в процессе дальнейших исследований, и в последующем изложении мы будем полагать, что возможна идеальная когерентная работа. Непрерывные газовые мазеры работают при сравнительно малых мощностях — порядка 20 *мвт*, и обладают очень хорошей когерентностью. Имеются сообщения о том, что ширина линии меньше 1 *кгц*, и пространственная когерентность согласуется с тем, что ожидается теоретически. Есть основания полагать, что мощность газовых лазеров может быть увеличена, так что эти устройства кажутся весьма перспективными для применения в системах связи.

КОГЕРЕНТНАЯ ОПТИКА

Наличие источников когерентного света в большой степени расширяет круг применений оптических систем. В частности, расходимость лучей света ограничивается лишь дифракцией. В обычном прожекторе лучи расходятся из-за конечности размеров источника света. Каждая точка источника, находящаяся на оптической оси, дает луч, параллельный оптической оси; в то же время многочисленные точки источника, расположенные вне оптической оси, дают лучи, исходящие под различными углами относительно оси. В результате совокупность всех этих лучей расходится на угол, определяемый наибольшим протяжением источника и фокусным расстоянием

объектива. В противоположность этому плоские волны, излучаемые оптическим мазером, расходятся так же, как луч антенны, имеющей такой же размер, измеренный в длинах волн. Иметь когерентный свет — все равно что иметь точечный источник.

Когда свет звезды фокусируется объективом телескопа при идеальных условиях видимости, образуется дифракционная картина, которая называется диском Эри. Она состоит из центрального светлого пятна, окруженного последовательностью кругов; зависимость интенсивности от радиуса r имеет вид

$$I(r) = I_0 \left\{ \frac{2J_1 [(\pi d/\lambda f) r]}{(\pi d/\lambda f) r} \right\}^2, \qquad (1)$$

где d — диаметр объектива, f — фокусное расстояние объектива, λ — длина волны и J_1 — функция Бесселя первого рода. Такая же дифракционная картина образуется в том случае, когда свет оптического мазера фокусируется идеальной линзой при условии, что луч равномерно освещает линзу. В общем случае дифракционная картина является фурье-преобразованием (двумерным) освещенности апертуры. Интенсивность в центре пятна равна [1])

$$I_0 = \frac{A}{\lambda^2 f^2} P, \qquad (2)$$

где A — площадь объектива, P — мощность светового пучка.

Принимая выходную мощность рубинового лазера равной 10 *квт* на волне 0,7 *мк*, получаем, что плотность мощности в центре изображения составляет приблизительно 10^{16} *вт/м*^{2}. Такая плотность энергии далеко превосходит все, что обычно получается в лаборатории. Для сравнения укажем, что плотность энергии на поверхности Солнца составляет 10^8 *вт/м*^{2}; таким образом, теоретически рубиновый лазер может создать плотность энергии, в сто миллионов раз большую плотности энергии

[1]) Это соотношение может быть получено непосредственно из уравнения радиопередачи (5) путем подстановки $D = f$, $A_T = A$, $P_T = P$ и $I_0 = P_R/A_R$. При этом опять предполагается равномерное освещение апертуры.

на поверхности Солнца! Эта высокая плотность энергии сопровождается соответственно высокой напряженностью электрического поля, согласно формуле

$$E = \sqrt{\eta I_0}, \qquad (3)$$

где $\eta = 120\pi$ — импеданс свободного пространства.

Для приведенного выше примера находим

$$E = \sqrt{120\pi \cdot 10^{16}} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ в/м} = 2 \text{ млрд. в/м!}$$

В таких полях могут иметь место эффекты, которые до сих пор не наблюдались. Появляются такие возможности, как изменение строения молекул, разрушение химических связей в небольших областях внутри однородных веществ и т. д.

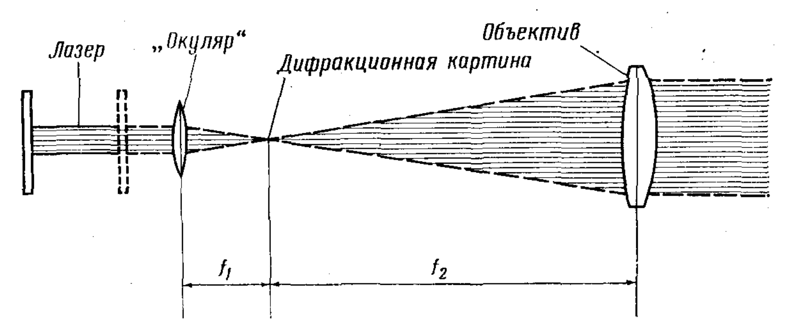


Рис. 3. «Оптическая антенна» с усилением по мощности $(f_2/f_1)^2$.

Если после фокусирования первичной линзой свет от дифракционной картины направить дальше, он сможет осветить гораздо большую линзу, которая в свою очередь может сколлимировать свет, как показано на рис. 3. Такое устройство в сущности является простейшим астрономическим телескопом, используемым «наоборот». Так же как разрешающая сила телескопа увеличивается пропорционально диаметру его объектива, так и расходимость лучей, выходящих из этой «оптической антенны», обратно пропорциональна диаметру ее объектива. Ширину главного лепестка от максимума до первого минимума можно найти из (1), положив $J_1 = 0$; получается обычная форму-

ла разрешающей способности телескопа

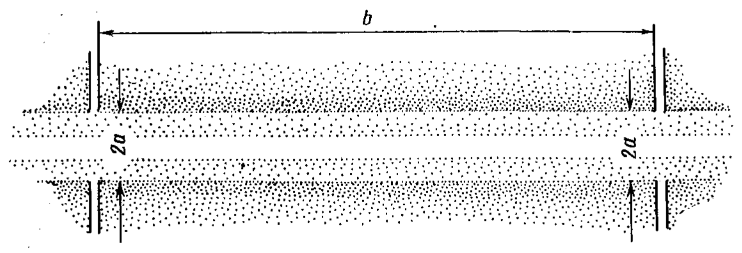
$$\frac{\pi d}{\lambda}\,\frac{r}{f}=\frac{\pi d}{\lambda}\,\theta=3{,}8317,$$

$$\theta=\frac{3{,}8317}{\pi}\,\frac{\lambda}{d}=1{,}22\,\frac{\lambda}{d}\,. \qquad (4)$$

Вследствие уменьшения расходимости луча удаленные точки будут освещены более интенсивно; усиление антенны по мощности будет равно квадрату обычного усиления устройства, используемого в качестве телескопа. При использовании в качестве прожектора лазер с телескопом может создавать исключительно малые пятна света на больших расстояниях. Например, 12-дюймовый телескоп дает световое пятно на Луне диаметром всего 2700 *м*. Освещенное пятно, естественно, соответствует кружку рассеяния того же объектива при использовании его в качестве телескопа.

Исключительно малая расходимость луча, получающаяся на оптических частотах с применением когерентного света, позволяет сделать предположение, что можно передавать энергию на большие расстояния со сравнительно небольшими потерями. По-видимому, это действительно так. Для данного максимального размера антенны (с учетом как приемной, так и передающей антенн) минимальные потери мощности будут в том случае, когда интенсивность луча в зависимости от расстояния от оси изменяется по определенному закону. Форма такого распределения приблизительно гауссова. Это распределение получается в лазере, резонатор которого состоит из двух софокусных вогнутых зеркал, описанных Фоксом и Ли [3]. Луч лазера с резонатором такого типа длиной 1 *м* имеет диаметр всего 1 *мм*: тонкая нить света! Однако его радиальное распределение интенсивности сохранится при прохождении через антенну того типа, которая показана на рис. 3, так что будет достаточно просто получить сечение луча с гауссовым распределением. Если диаметры передающей и приемной апертур равны $2a$ и расстояние между ними b, как показано на рис. 4, тогда в таком луче потери мощности будут равны значениям, указанным в таблице и в примере на этом рисунке. Потери в одну двадцатую процента на расстоянии

20 миль — это меньше, чем потери в средней передающей линии. Однако таких малых потерь можно достичь лишь тогда, когда отсутствуют рассеяние и рефракция в среде, следовательно, лишь в свободном пространстве или при



Р и с. 4. Передача между двумя апертурами.

$a^2/b\lambda$	0,5	0,7	1,0
Потери, %	10	1,2	0,05

($\lambda=0{,}7$ *мк*; $2a=12$ *дюйм*)

наличии контролируемой атмосферы в трубе, соединяющей две апертуры. Другая реальная возможность — это передача энергии оптическими методами с Земли на спутник или с одного космического корабля на другой.

СВЯЗЬ С ПОМОЩЬЮ КОГЕРЕНТНОГО СВЕТА

Очевидным применением когерентного света является использование его для целей связи; поэтому мы должны рассмотреть такие факторы, как ширина полосы пропускания нового типа канала, потери при передаче, внутренние шумы и стоимость.

В красном конце спектра частота света приблизительно равна $4\cdot10^{14}$ *гц*. Таким образом, полоса в 1% в этой части спектра составляет 4 млн. *Мгц*, что достаточно для *миллиарда* одновременных телефонных разговоров. Следовательно, теоретически возможно передавать все разговоры, происходящие во всем мире одновременно, при помощи одной нити света диаметром 1 *мм*. По-видимому, полоса даже слишком велика. Это становится особенно ясно, если учесть, что благодаря возможности получения исключительно направленных лучей в одном и том же диапазоне частот может разместиться большое число одновременных каналов без взаимных помех. Проблема

заключается не в недостатке места в спектре, а в том, как его использовать: как модулировать оптический мазер или его выход, чтобы заполнить спектр. В настоящее время в этом направлении ведутся работы; луч лазера уже был замодулирован частотами вплоть до сантиметрового диапазона, так что уже достигнуты каналы шириной 10 000 *Мгц*, правда, ценой большой мощности модуляторов. Нет сомнения, что будут найдены пути получения исключительно широких полос модуляции и, следовательно, использования полосы пропускания оптических каналов; но даже при меньшей полосе эти каналы, как мы увидим, достаточно привлекательны.

Потери при передаче в оптическом канале, очевидно, меньше, так как легко достижимы весьма направленные лучи, что было показано в примере с передачей энергии. Основная формула потерь при передаче в оптическом диапазоне такая же, как в радиодиапазоне, а именно [1])

$$\frac{P_R}{P_T}=\frac{A_T A_R}{\lambda^2 D^2}, \qquad (5)$$

где P_T — передаваемая мощность, P_R — принимаемая мощность, A_T — площадь передающей антенны, A_R — площадь приемной антенны, λ — длина волны, D — расстояние между антеннами.

В этой формуле предполагается равномерное освещение апертуры передатчика, при котором получается наименьшая потеря мощности на оси. λ^2 в знаменателе означает, что принятая мощность пропорциональна квадрату частоты; этот факт отражает возрастающую концентрацию энергии передающей антенной с ростом частоты. Следует помнить, что при заданных размерах антенн любое улучшение передачи при увеличении частоты вызвано исключительно этой причиной.

Существуют практические ограничения направленности лучей, которые достижимы даже в оптическом диапазоне. Для того чтобы достичь теоретической расходимости луча, форма зеркала объектива должна не более чем на

[1]) Формулы (1), (2) и (5) могут быть получены из принципа Гюйгенса. Соотношение (5) следует также из того факта, что апертура изотропной антенны равна $\lambda^2/4\pi$, что можно показать путем термодинамических рассуждений.

четверть волны отличаться от идеальной фигуры по всей поверхности. Хотя требования к поверхности линз менее жестки, но зато этих поверхностей больше. По мере увеличения размера такие требования к точности становится все более трудно выполнить. Например, в 200-дюймовом телескопе полная разрешающая сила достигается уже на пределе.

Если даже оптические поверхности будут идеальными, то практически достижимая острота луча будет ограничиваться турбулентностью в атмосфере. Условия видимости редко бывают достаточно хорошими для того, чтобы разрешить точки, отстоящие друг от друга меньше чем на полсекунды дуги, так что более острые лучи не годятся для связи с поверхности Земли в космическое пространство. Вдоль поверхности Земли ситуация еще хуже из-за большей длины пути в плотном слое воздуха, поэтому в тех случаях, когда нет контролируемой атмосферы или вакуума, нужно применять лучи с угловой расходимостью по крайней мере в несколько секунд.

Если далее предположить, что эффекты атмосферной рефракции отсутствуют (например, в вакуумной трубе или в свободном пространстве), то остается проблема направления исключительно острого луча в нужное место. Вибрации поддерживающей конструкции, изгибы опор из-за теплового расширения и, в случае свободных тел, изменения моментов инерции благодаря движению отдельных частей внесут ошибки наведения, которые трудно сделать меньше одной секунды дуги.

Помимо проблем, связанных с турбулентностью среды, большие потери мощности могут происходить из-за рассеяния на молекулах и взвешенных частицах. И опять использование вакуума или, может быть, очищенной гелиевой атмосферы понизит эти потери. Далее, любой путь на Земле должен быть криволинейным, чтобы соответствовать возможным трассам и земной поверхности. Этого можно достигнуть с помощью зеркал или призм, размещенных вдоль пути с небольшими интервалами. Очень трудно изменить направление распространения такого луча, потеряв при этом меньше 1%, так что на каждые 100 таких поворотов ожидаемое ослабление должно быть больше чем в e раз.

Квантовомеханический анализ показывает, что даже идеальный усилитель имеет отличную от нуля спектральную плотность мощности шума; отнесенная ко входу, она равна

$$\psi(\nu) = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} + h\nu. \quad (6)$$

Первый член этого уравнения представляет тепловой шум; на низких частотах, когда $kT \gg h\nu$, этот член превращается в известный член kT *вт/гц*, в то время как второй член пренебрежимо мал по сравнению с первым. На высоких частотах, когда $kT \ll h\nu$, тепловой шум исчезает, а второй член становится главным, и полный шум больше, чем на низких частотах. Поэтому на высоких частотах для достижения заданного отношения сигнала к шуму необходимо принять бо́льшую мощность сигнала. Это справедливо независимо от того, применяется ли когерентное или некогерентное детектирование, и вытекает по существу из того факта, что с ростом частоты увеличивается энергия, приходящаяся на один квант. На оптических частотах отношение сигнал/шум равно

$$\frac{S}{N} = \frac{P_R}{h\nu B} = \frac{W_R}{h\nu/2} = 2\bar{n}, \quad (7)$$

где W_R — средняя энергия, приходящаяся на один принятый импульс или на интервал Найквиста $1/2B$, $\bar{n}$ — среднее число квантов на импульс или на интервал Найквиста. Таким образом, число принятых квантов, приходящихся на один импульс (или на интервал Найквиста) непосредственно связано с отношением сигнал/шум.

Линейный рост энергетической плотности шума с частотой вычитается из квадратичного роста мощности принятого сигнала при увеличении частоты (при фиксированном размере антенны), так что получается улучшение отношения сигнал/шум лишь первой степени относительно частоты.

По-видимому, оптические мазеры и связанное с ними оборудование не должны быть намного дороже, чем другие оконечные устройства в современных каналах связи. Главный вопрос в применении оптических мазеров для телефонной связи представляет затраты на сооружение

и эксплуатацию необходимых светопроводов. В настоящее время нет достаточного количества данных даже для грубой оценки стоимости одной мили. Вероятно, хорошие светопроводы не будут дешевыми по сравнению, например, с коаксиальным кабелем, но если можно будет найти способы очень широкополосной модуляции, то их стоимость, приходящаяся на один канал связи, может стать достаточно малой.

ЗЕМНОЙ ПРИМЕР

Используя уравнения, приведенные в предыдущей главе, можно рассчитать работу любого канала, за исключением неизвестных потерь в среде. В качестве конкретного примера предположим, что у нас имеется газовый лазер непрерывного действия с выходной мощностью 80 *мвт* на волне 1 *мк*. Мы хотим использовать передающую и приемную апертуры диаметром не более 1 дюйма; нам требуется полоса 4 *Мгц* и отношение сигнала к шуму в приемнике 40 *дб*. В этом случае оказывается, что максимальное расстояние равно 1600 *км*. На первый взгляд это число не кажется удивительным, так как в настоящее время существуют коаксиальные кабельные линии большей протяженности; поражает тот факт, что такое расстояние достигается без усилителей. Потери в среде и в отражателях уменьшат это расстояние раз в десять.

СВЯЗЬ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Представляет интерес рассчитать возможности оптических мазеров на больших расстояниях, таких, как расстояния в космической связи. Пусть у нас будет канал с импульсной модуляцией, так что имеется возможность использовать устройства, подобные рубиновому мазеру с его большой мощностью. По приведенным выше формулам передачи были рассчитаны кривые рис. 5. На этом графике по оси ординат отложено среднее геометрическое из диаметров объективов передатчика и приемника, т. е. $\sqrt{d_T d_R}$. Кривые показывают, какие требуются средние диаметры объективов в зависимости от расстояния между

передатчиком и приемником. Над каждой кривой указано значение параметра n_1, обозначающего ожидаемое число принимаемых фотонов, приходящихся на каждый джоуль излучаемой энергии. Следовательно, если энергия излучаемого импульса равна W джоулей, то в среднем будет принято $\bar{n} = n_1 W$ фотонов. Из уравнения (7)

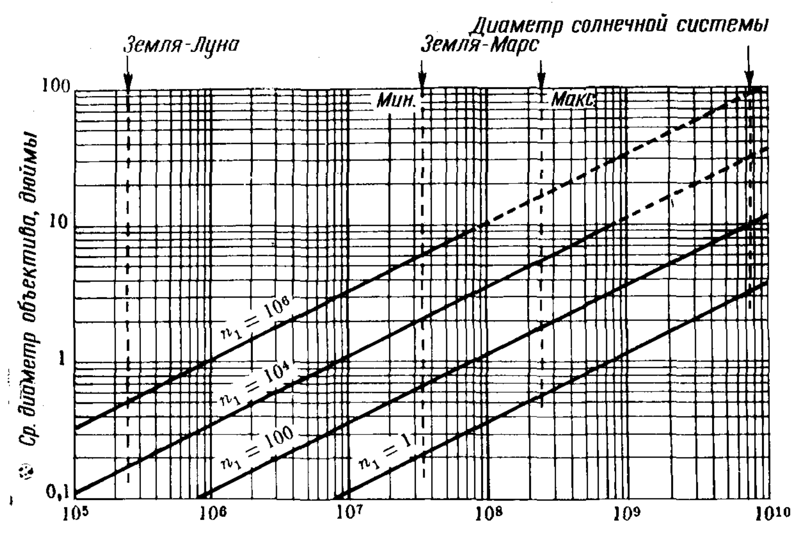


Рис. 5. Когерентная оптическая передача на межпланетные расстояния.

видно, что для идеального приемника отношение сигнала к шуму, выраженное в децибелах, равно $3 + 10 \lg n$. Учитывая неидеальную работу приемника, можно считать

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\partial б} \approx 10 \lg n.$$

В качестве первого примера рассмотрим рубиновый мазер с энергией в импульсе 10 *дж*. Оказывается, что для канала связи между Землей и Луной с $S/N = 60$ *дб* необходим средний диаметр объектива всего 0,3 дюйма. Иначе говоря, для связи будет достаточно самих рубиновых стержней без всякой оптической системы. Другой пример: для канала связи с отношением сигнала к шуму 40 *дб*

между Землей и Марсом даже в верхнем соединении (т. е. с противоположной по отношению к Земле стороне от Солнца) достаточно 3-дюймового объектива. Наконец, мы замечаем, что 10-дюймового телескопа будет достаточно для обеспечения отношения сигнала к шуму 30 *дб* во

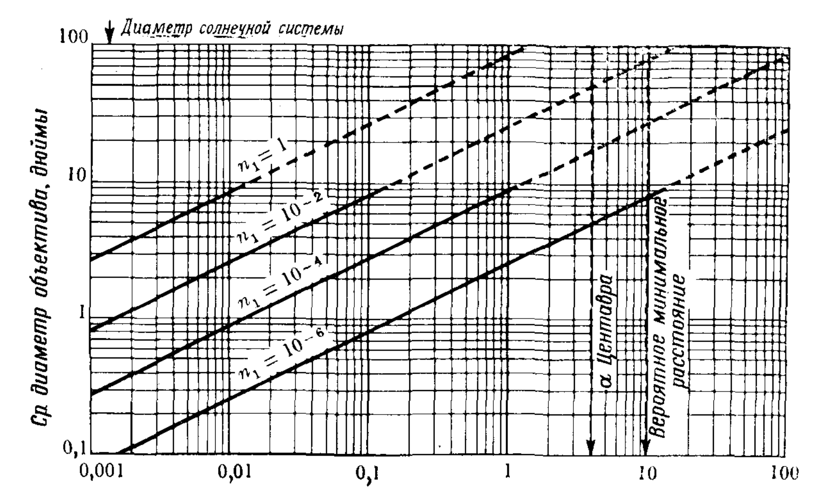


Рис. 6. Когерентная оптическая передача на межзвездные расстояния.

всей солнечной системе. Из этих примеров видно, что оптические мазеры идеально подходят для межпланетной связи.

Можно спросить: что будет, если попробовать применить лазеры для межзвездной связи? Для этого случая ситуация иллюстрируется рис. 6. Теперь мы видим, что n_1 меняется от единицы до 10^{-6}, так что для точек, расположенных на нижней кривой, требуется импульс в миллион джоулей, чтобы принять в среднем один фотон. Выше диаметра 10 дюймов кривые показаны пунктиром, так как применение большей плотности луча, связанной с большими диаметрами, вряд ли оправдано по причинам, указанным выше. Несмотря на то что связь с помощью лазеров на современном уровне их развития является практически осуществимой в пределах солнечной системы,

из рис. 6 видно, что диаметр солнечной системы равен всего одному световому «миллигоду». В то же время ближайшая звезда α Центавра находится на расстоянии 4 световых лет. Эта звезда двойная, и, вероятно, не имеет планетной системы. Для того чтобы найти звезды типа Солнца, такие, как ε Эридана, мы должны удалиться на

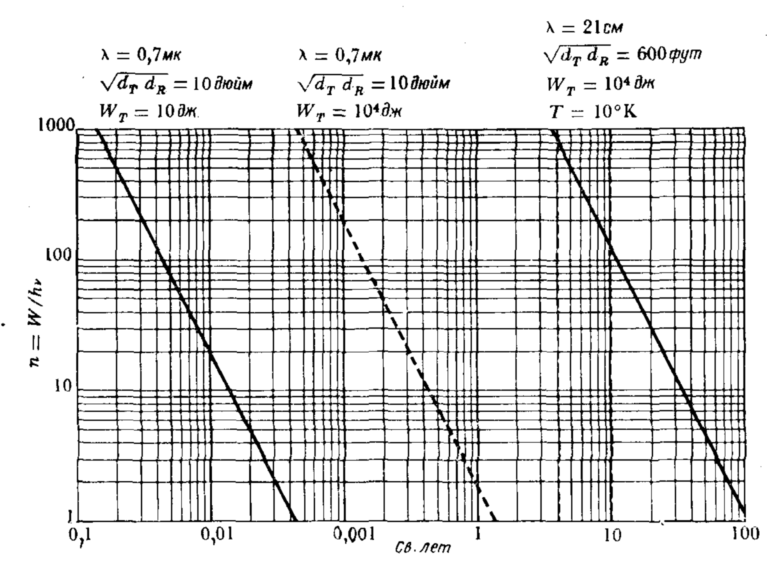


Рис. 7. Дальнобойность — оптический мазер против сантиметровой системы.

10 световых лет, так что не ближе, чем на таком расстоянии имеется отличная от нуля вероятность встретить другую разумную жизнь. Из кривых ясно, что понадобится огромное увеличение мощности оптических мазеров, прежде чем станет возможной межзвездная связь с их помощью. На рис. 7 сравниваются действия оптических мазеров с мощной практической системой на частоте 1420 *Мгц* на межзвездных расстояниях. Ординатой здесь является ожидаемое число фотонов, приходящихся на один импульс, в случае оптической системы и величина W_R/kT, которая имеет такой же смысл для радиосистемы. Крайняя левая кривая относится к современному рубиновому мазеру с 10-дюймовыми антеннами, средняя кривая демонстрирует эффект увеличения мощности до 10^4 *дж* на импульс; мы видим, что даже в этом случае ожидается значительно меньше одного фотона на импульс для расстояния 10 световых лет. В противоположность этому радиосистема вблизи частоты линии водорода ($\lambda = 21$ *см*), использующая 180-метровые антенны типа антенны, сооружаемой в настоящее время в Шугар Грув, при мощности передатчика 10^4 *дж* на импульс (например, 10 *Мвт* в 1 *мсек*) и шумовой температуре 10° K, будет действовать согласно кривой на рис. 7 и сможет обеспечить отношение сигнала к шуму больше 20 *дб* на расстоянии 10 световых лет. На рис. 7 расходимость лучей радиосистемы в 417 раз больше, чем оптической системы. Причина лучшего действия радиосистемы, несмотря на худшую направленность, двояка. Во-первых, приемная антенна имеет в 720 раз больший диаметр и, следовательно, принимает в $(720/417)^2 = 3$ раза большую мощность. Во-вторых, мощность шума на импульс в 2000 раз меньше на радиочастотах по сравнению с оптическими. Поэтому на данном расстоянии отношение сигнал/шум для радиосистемы в 6000 раз больше, чем для оптической. Следовательно, для данного значения S/N расстояние в $\sqrt{6000} = 77{,}5$ раза больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптические мазеры обеспечивают удивительные возможности в нескольких областях. Во-первых, они позволяют получить огромные плотности мощности в очень малой области пространства. Поэтому они являются инструментом для исследования влияния таких плотностей на физические и химические процессы. Кроме того, несомненно, имеются сотни технологических процессов, в которых могут быть использованы исключительно высокие плотности энергии. Напрашиваются такие примеры, как микрогравировка для изготовления сложных полупроводниковых устройств и микроминиатюрных элементов схем разных видов. Например, сетки для клистронов могут быть изготовлены путем прожигания регулярной последовательности отверстий в тонкой металлической пленке.

Импульсы параллельного света из оптического мазера могут быть сфокусированы хрусталиком глаза на сетчатку, где они вызовут прожигание ткани в результате ее испарения и последующие разрушения. Этот способ привлекателен в качестве средства предотвращения отделения сетчатки без хирургического вмешательства, которое необходимо в случаях прогрессирующей глаукомы.

Оптические мазеры также дают возможность получать гораздо более плотные пучки излучения, чем это было возможно до сих пор. Такие пучки смогут обеспечить эффективную связь на больших расстояниях. Небольших антенн достаточно даже для межпланетных расстояний, но для межзвездных расстояний нужны большие антенны, что неосуществимо, и оптические системы не смогут конкурировать с дециметровыми и сантиметровыми радиосистемами. Остронаправленные лучи позволят создать системы оптической локации и обнаружения с недоступной до сих пор разрешающей способностью. Для некоторых применений в космосе, когда приемник может находиться в недоступном месте, например на спутнике, когерентные оптические лучи могут оказаться экономичными для передачи энергии. Было много слухов о том, что с развитием оптических мазеров могут быть получены пресловутые «лучи смерти». Ясно, что потребуется чудовищное увеличение излучаемой мощности, прежде чем такие лучи станут эффективными.

Оптические мазеры обеспечивают огромную полосу пропускания связи как из-за большого числа герц в малой части видимого спектра, так и благодаря разделению пространства, получающемуся при плотных пучках. Наконец, следует добавить, что оптические мазеры еще настолько новы и революционны, что несомненно появятся новые применения, которые нельзя предвидеть сейчас. Некоторые применения могут по значению далеко превзойти все, что здесь обсуждалось.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maiman T. H., Nature, 187, 493 (1960).
2. Bell. Lab. Record, 39, No. 3 (1961).
3. Fox A. G., Li T., Bell System Tech. J., 40, No. 2 (1961).

Р. Шварц и К. Таунс

23 МЕЖЗВЕЗДНАЯ И МЕЖПЛАНЕТНАЯ СВЯЗЬ ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКИХ МАЗЕРОВ

Хорошо известна дальняя связь с помощью радиоволн; имеется несколько интересных предложений [1—3] о возможности межзвездной связи на радиоволнах СВЧ-диапазона и о поиске сигналов от разумных существ на планетах, связанных с соседними звездами. Предположение состоит в том, что любознательность, подобная нашей, заставит высокоразвитые цивилизации, «привязанные» к другим звездам, приложить определенные усилия с целью установления контактов с какой-либо другой разумной жизнью, которая может существовать на соседних планетных системах. На настоящем уровне нашего технологического развития радиоволны являются главным средством дальней связи, и, вероятно, по этой причине в этих предложениях основное внимание уделялось радиодиапазону. Однако теперь становится ясно, что мы приближаемся к созданию генераторов-мазеров и других приборов в оптическом диапазоне или вблизи него, которые также позволят посылать обнаружимые световые сигналы между планетами двух звезд, разделенными расстоянием в несколько световых лет.

Наши собственные мазерные методы в оптическом и соседних с ним спектральных диапазонах все еще находятся в зачаточном состоянии; год назад еще не было ни одного такого действующего прибора [4, 5]. В последующие 10 лет должно произойти мощное развитие. По-видимому, лишь историческая случайность помешала открытию

оптических мазеров 30 или более лет назад; в этом случае они уже находились бы на высокой стадии развития. Это означает, что какая-то цивилизация могла пойти по другому историческому пути и достичь больших успехов в использовании оптических или инфракрасных мазеров, а не коротких радиоволн.

Мы предлагаем рассмотреть возможность передачи оптического луча с планеты, связанной со звездой, удаленной на расстояние в единицы и десятки световых лет, с мощностью, достаточной для установления связи с Землей. Есть некоторая вероятность того, что такие передачи, ведущиеся другим обществом, находящемся примерно на таком же уровне, как и мы, могут быть надежно обнаружены современными телескопами и спектрографами; ниже мы обсудим соответствующие методы обнаружения. Связь между планетами в пределах нашей солнечной системы с помощью лучей оптических мазеров a fortiori (тем более) является осуществимой.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ МАЗЕРОВ

Современные рубиновые мазеры дают импульсные оптические лучи мощностью 10 *квт* [6] или еще более короткие импульсы с пиковой мощностью до 100 *квт*. Это излучение концентрировано в полосе пропускания порядка 0,02 $см^{-1}$. Мазеры другого типа, работающие в непрерывном режиме с мощностью порядка 0,02 *вт*, излучают волну, синфазную по всей поверхности отражателя мазера (диаметром около $^1/_2$ дюйма) и концентрированную в интервале частот порядка 10 *кгц* [7]. С точки зрения когерентности второй случай гораздо ближе к теоретически ожидаемому [4] для идеального мазера. По-видимому, нет других причин, кроме неизбежной диссипации энергии, по которым оптические мазеры на твердом теле не могут работать непрерывно с большой мощностью и с кратковременной монохроматичностью, близкой к теоретически ожидаемой, т. е. с полосой частот, много меньшей 1 *Мгц*.

Рассмотрим теперь направленность луча оптического мазера. Если мазер дает волну длиной λ с постоянной фазой на поверхности диаметром d, то угловая ширина

испускаемого луча приблизительно равна λ/d. Но угловая ширина луча, очевидно, может быть уменьшена дополнительно, если мазер работает совместно со вспомогательной оптической системой. Предположим, что на пути луча помещена идеальная линза с фокусным расстоянием d и диаметром d. Тогда в фокусе весь луч будет иметь диаметр порядка λ. Если фокус этой линзы будет совпадать с фокусом гораздо большей идеальной линзы или отражающего зеркала диаметром D и фокусным расстоянием D или больше, то луч выйдет из второй линзы с угловой дифракционной шириной, определяемой ее апертурой, т. е. λ/D. Чтобы добиться этого, необязательно фокусировать луч в маленькое пятно; это предполагалось лишь для лучшего понимания. Факторы, ограничивающие получение интенсивных направленных лучей, связаны, вероятно, не с самим источником, а с техническими проблемами изготовления больших зеркал необходимой точности и исправления оптических искажений из-за нагрева лучом.

Для целей обсуждения рассмотрим два оптических мазера со следующими характеристиками:

Система (*а*). Мощность 10 *квт*, непрерывная; частота $\sim$ 5000 Å, ширина полосы частот $\sim$ 1 *Мгц*, или $3 \cdot 10^{-5}$ $см^{-1}$; диаметр рефлектора $D = 200$ дюймов (максимальный размер современного телескопа); ширина луча (λ/D) 10^{-7} *рад*.

Система (*б*). Группа из 25 мазеров, каждый с характеристиками мазера системы (а), но с эффективной апертурой $D=4$ дюйма (следовательно, ширина луча 1″, или $5 \cdot 10^{-6}$ *рад*). Все мазеры группы установлены параллельно в одном направлении с точностью до ширины луча.

Ширина луча системы (а) может быть реализована в системе, установленной на платформе, расположенной над (или в отсутствие) планетной атмосферой и имеющей достаточно точную геометрию, так что ограничивающим фактором является дифракция (см. ниже). При работе из глубины атмосферы, подобной земной атмосфере, атмосферная турбулентность ограничивает эффективную ширину луча до такого значения, которое получается в системе с 4-дюймовым телескопом, так что в этом случае более разумно выбрать систему (б).

ОБНАРУЖИМОСТЬ СИГНАЛОВ МАЗЕРА

Для обнаружения луча мазера, приходящего от соседней звезды, имеется два основных критерия: 1) в приемнике должно быть достаточно фотонов на единицу площади для того, чтобы их можно было обнаружить с помощью линзы приемлемых размеров и в течение разумного времени; 2) он должен быть отличим от фона, создаваемого светом звезды.

Система с мазером, действующая над атмосферой [система (а)], дает луч интенсивностью I, где $I = $ поток$/\lambda D^2 = 10^{18}$ *вт/стер* на волне 5000 Å, или на единичный интервал частот $I_\nu = I/\Delta\nu = 3\cdot 10^{22}$ *вт/стер·см* в полосе частот $\Delta\nu = 3\cdot 10^{-5}$ $см^{-1}$.

Интенсивность излучения системы (б) будет меньше в 100 раз. При наиболее благоприятных условиях звезду величины $8^m,3$ можно увидеть невооруженным глазом; следовательно, луч системы (а) можно увидеть глазом на расстоянии 0,1 светового года. С помощью обычного бинокля на нормальном небе это расстояние вырастет до 0,4 светового года. Для системы (б) соответствующие расстояния будут меньше в 10 раз.

С расстояния 10 световых лет систему (а) можно увидеть визуально в 200-дюймовый телескоп или сфотографировать обычным способом с экспозицией 1 *мин*. За это время приходит около 10^6 квантов сигнала; по-видимому, оно может быть значительно уменьшено путем специальных методов. Расстояние 10 световых лет имеет значение потому, что, как отметили Дж. Коккони и Ф. Моррисон [1], в пределах сравнимого расстояния 16,5 светового года имеется семь звезд почти такой же светимости и спектральных характеристик, как наше Солнце. Для системы (б) потребуется соответственно экспозиция длительностью около 1,5 *час* для обнаружения на расстоянии 10 световых лет с помощью того же телескопа. Следовательно, критерий, предложенный в [1], заведомо выполняется.

Указанные выше интенсивности луча вполне достаточны для связи между планетами нашей солнечной системы. Конечно, они должны выделяться на фоне света, отраженного от поверхности планеты. Интенсивность

солнечного света, рассеянного поверхностью Земли, меньше, чем $1/\pi$ × площадь поперечного сечения × солнечная постоянная $= 6\cdot 10^{16}$ *вт/стер*, так что лучи мазера можно легко увидеть на фоне Земли, если наблюдать визуально через оптический фильтр с полосой несколько сот ангстрем или в телескоп умеренных размеров, в виде яркого пятна, наложенного на изображение планеты. Таким образом, мы имеем другой метод связи, обладающий в ряде случаев некоторыми преимуществами по сравнению с радиосвязью. Например, благодаря направленности можно нацелить луч с Марса или с Луны только на данную часть поверхности Земли. Кроме того, для приема простых сигналов не нужно никакой другой аппаратуры помимо глаза человека.

Рассмотрим теперь вопрос об обнаружении таких сигналов с далекой планеты на фоне света ее звезды. Очень мало надежды разрешить их в пространстве по отдельности. Земля и Солнце с расстояния 10 световых лет видны под углом около $1/2''$. Следовательно, свет одинаковой интенсивности от этих двух источников на таком расстоянии может быть разрешен с помощью телескопа очень высокого качества. Но, вероятно, легче будет воспользоваться высоким спектральным разрешением, чтобы отличить излучение мазера от излучения звезды.

Можно взять спектр нашего Солнца в качестве характеристики света, который нужно отделить. Интенсивность континуума на единичный интервал частот имеет максимум около 5000 Å, равный приблизительно

$$I_\nu(5000\text{Å}) = 1{,}2\cdot 10^{21} \ \textit{вт/стер·см}$$

с полной интенсивностью

$$I = 3\cdot 10^{25} \ \textit{вт/стер}.$$

Видно, что максимальная интенсивность звезды на единичный интервал составляет $1/25$ интенсивности мазера системы (а) и в 4 раза больше интенсивности мазера системы (б). Для увеличения интенсивности мазера относительно звезды выбранная нами ширина полосы частот 1 *Мгц*, вероятно, может быть уменьшена, но возможные трудности создания мощных мазеров с такой стабильностью и другие соображения, о которых будет сказано

дальше, делают нежелательным применение такой узкой полосы частот.

Для Солнца интенсивность континуума I_ν уменьшается более чем на порядок ниже 2500 Å и выше 15 000 Å и на два порядка ниже 2000 Å и выше 4 *мк*. На этот континуум наложена дискретная структура фраунгоферовых линий поглощения и эмиссионный спектр в далеком ультрафиолете. Наиболее сильные линии поглощения Ca II, Sr II и Na обеспечивают окна шириной в несколько ангстрем, в которых интенсивность на порядок меньше, чем в континууме. Разумеется, надо помнить, что атмосфера Земли ограничивает наземные наблюдения длинами волн между 2900 Å и несколькими микронами.

Логически следует либо выбрать частоту передачи в далеком ультрафиолете, насколько позволяет атмосферное поглощение, либо выбрать сильную фраунгоферову линию (например, линии Ca II H и K). В любом случае получается выигрыш в 10—20 раз по сравнению с передачей на λ 5000 Å; выбор частоты, вероятно, будет диктоваться наличием подходящего вещества для мазера, обеспечивающего желаемую частоту. Если бы дело заключалось только в солнечной интенсивности, еще два или три порядка можно было бы выиграть, принимая над атмосферой Земли в области 1400—1800 Å. Однако уменьшение отражающей способности зеркал и возможные трудности работы мазеров на этих длинах волн делают эту область нежелательной, даже если прием над атмосферой не окажется слишком сложным. Преимущества передачи в инфракрасной области по сравнению с 5000 Å будут компенсированы расширением луча, если ограничивающим фактором является дифракция, как в системе (а).

Если мазер системы (а) работает в линии поглощения, скажем Ca II H или K, то отношение интенсивностей мазера и Солнца равно 300 в узкой полосе $3\cdot10^{-5}$ *см*$^{-1}$. Спектрометр с разрешением 0,01 *см*$^{-1}$ (т. е. с разрешением несколько лучше, чем 10^6 на этой частоте) выделит сигнал мазера, равный фону звезды. Современные дифракционные спектрографы высокой светосилы и разрешающей силы дают разрешение, близкое к этой величине

(например, эшеле-спектрограф Гаррисона [8]). Применение интерферометрических методов может обеспечить на несколько порядков лучшее разрешение. Инструмент, сравнимый с кудэ-спектрографами, разработанными для работы на 200-дюймовом телескопе, имеющий нужное разрешение, по-видимому, сможет дать приемлемое фотографическое изображение с экспозицией, несколько большей одного часа. С разрешением, гораздо меньшим 0,01 *см*$^{-1}$, можно еще получить сигналы, обнаружимые на фоне, хотя теперь сигнал мазера не будет так явно у́же некоторых эмиссионных линий спектра.

Мазер системы (б) даст интенсивность, в три раза большую фона звезды, опять же в полосе $3\cdot10^{-5}$ *см*$^{-1}$. Хотя можно разработать подходящие детекторы с такой узкой полосой, сейчас их еще нет. В спектрометре с разрешением 0,01 *см*$^{-1}$ сигнал мазера будет составлять 1% фона и отличить его можно будет только на пределе.

Следует рассмотреть возможность того, что изменения допплеровских сдвигов в течение экспозиции будут превышать спектральное разрешение и тем самым ослаблять изображение. Орбитальное и вращательное движение Земли, орбитальное движение спутника вокруг Земли, если он будет применяться в качестве платформы для инструмента, и соответствующие движения передающего источника могут дать допплеровские смещения, которые могут изменить частоту и смазать сигнал мазера. Максимальное изменение относительного смещения частоты из-за допплеровского сдвига $(\Delta\nu)_D$ от источника сигнала, движущегося по круговой орбите радиуса r с угловой скоростью ω, равно

$$\frac{1}{\nu}\left|\frac{d(\Delta\nu)_D}{dt}\right|_{\text{макс}}=\frac{\omega^2 r}{c},$$

где ν — частота и c — скорость света. Беря в качестве иллюстрации движения в нашей солнечной системе, получим максимальное значение $2\cdot10^{-10}$ в секунду для наземного передатчика (главным образом за счет вращения Земли) и 10^{-11} в секунду для передатчика, расположенного на Луне. Для того чтобы такие допплеровские смещения на приемном и передающем концах линии передачи оставались в пределах требуемого разрешения 0,01 *см*$^{-1}$, время фотографической экспозиции в видимой области

спектра должно быть ограничено примерно одним часом. Как уже отмечалось, такая экспозиция нужна для получения хорошего спектра, если передатчик расположен на расстоянии 10 световых лет. С другой стороны, как передатчик, так и приемник могут, конечно, компенсировать свои допплеровские смещения, которые им хорошо известны.

Вопрос об экспозиции или времени накопления имеет различное значение в зависимости от того, занимается ли наблюдатель исследованием спектра или он уже нашел подходящую линию. В первом случае на одной фотографии можно изучать сотни ангстрем спектра, и поэтому спектральный поиск для данной звезды не осложнен чрезмерно большим временем экспозиции. Можно предполагать, что искомая спектральная линия будет исключительно узкой, расположенной на необычной для данной звезды частоте; она может быть переменной по интенсивности. Вслед за обнаружением какой-либо из этих особенностей должно быть проведено более тщательное исследование. Если найдена подходящая линия, можно использовать фотометрическую систему более высокой чувствительности, которая уменьшит требуемое время накопления, что позволит записывать модуляцию сигнала. Например, в 200-дюймовый телескоп с эффективной дисперсионной системой модуляцию можно наблюдать глазом.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, если постулировать существование оптического мазера с характеристиками системы (а), направленного на нас с расстояния 10 световых лет, то на современном уровне техники его можно обнаружить. Система (б) обнаружима либо на пределе, либо с хорошим превышением сигнала над фоном, если будут разработаны узкополосные оптические приемники.

Преимущества, вытекающие из когерентности излучения на очень большой апертуре и из теоретической возможности получения когерентности между несколькими мазерами, сводятся на нет, если система должна работать из глубины атмосферы, подобной земной. В этом случае указанная выше система (б), может быть с увеличенной

мощностью или числом элементов системы, кажется более перспективной. Значительное увеличение числа элементов не обязательно должно сопровождаться чрезмерными затратами. Если принять в качестве критерия обнаружимости превышение сигнала над фоном в 1%, то описанная выше система (б) будет достаточной для этой цели. Надо отметить дополнительные трудности, связанные с работой в атмосфере. Местная турбулентность воздуха, происходящая от контакта горячих поверхностей линз и зеркал с атмосферой, еще больше расширит луч, если отсутствует соответствующее регулирование. Плотность мощности, отраженной от поверхности зеркала системы (а), близка к плотности мощности прямого солнечного света. Вероятно, проблемы, связанные со взаимодействием больших мощностей с тщательно контролируемыми оптическими системами, будут одними из самых трудных.

Уникальные преимущества мазерных источников лучше всего использовать при работе с высотных баллонов, космических платформ или естественной Луны — возможность, которая не могла рассматриваться серьезно несколько лет назад, но сегодня она более приемлема. Характеристики идеальной системы (а), вероятно, могут быть реализованы с помощью одного большого зеркала, хотя в очень больших зеркалах, с которыми мы имеем дело, не было достигнуто наибольшее возможное угловое разрешение (угловое разрешение 200-дюймового телескопа составляет около $^1/_3{}''$ [9]). Достижение предела, обусловленного дифракцией, может оказаться весьма трудной задачей. Однако интенсивность луча системы (а) может быть получена также с помощью системы меньших зеркал высокой точности, работающих, вероятно, в фазе (в этом случае интенсивность луча изменяется как квадрат числа зеркал). В этой связи следует отметить, что 36-дюймовое зеркало, которое предполагается использовать в проекте высотного баллона «Стратоскоп-II» [10], отлито из плавленого кварца и должно достичь своего теоретического углового разрешения, равного $^1/_{10}{}''$.

Установление того факта, что частота линии водорода в СВЧ-диапазоне не является единственным разумным местом, где следует искать возможные межзвездные сигналы, и что оптическая область также является разумной,

привело бы к расширению возможностей, с одной стороны, и к нежелательному усложнению поисков — с другой. Какие другие методы, которые могут оказаться естественными для других цивилизаций, мы упустили? Далекая ультрафиолетовая и инфракрасная области поглощаются всеми мыслимыми пригодными для жизни атмосферами и, следовательно, не будут использоваться, если не осуществлять внеатмосферный прием. Потоки заряженных частиц будут подвержены нежелательному искривлению в межзвездных полях. Мы не видим путей получения нейтронных пучков или электромагнитных волн требуемой интенсивности, более коротких, чем ультрафиолет [4]. С другой стороны, быстрый прогресс науки может привести к тому, что другая цивилизация, опередившая нас в развитии всего на несколько тысяч лет, может обладать такими возможностями, которые мы сейчас исключаем — например, они уже могут посылать к нам исследовательскую автоматическую ракету. Но поскольку до сих пор мы ничего подобного не обнаружили, вероятно, будет правильно изучить спектры звезд с высоким разрешением с целью поиска необычных узких линий, расположенных на необычных частотах или с переменной интенсивностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cocconi G., Morrison P., Nature, **184**, 844 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 177—182.)
2. Purcell E. M., Proc. I. R. E. (June 1959). (См. настоящий сборник, стр. 132—157.)
3. Струве О., Комптоновская лекция в Массачусетском технологическом институте, ноябрь 1959 г.
4. Schawlow A. L., Townes C. H., Phys. Rev., **112**, 1940 (1958).
5. Maiman T. H., Nature, **187**, 493 (1960).
6. Maiman T. H., Brit. Commun. Electron., **7**, 674 (1960).
7. Javan A., Bennett W. R., Jr., Herriot D. R., Phys. Rev. Letters, **6**, 106 (1961).
8. Harrison G. R., Archer J. E., Camus J., J. Opt. Soc. Am., **42**, 706 (1952).
9. Bowen I. S., Publ. Astron. Soc. Pacific, **62**, 91 (1950).
10. Phys. Today, **14**, 82 (1961).

Р. Брейсуэлл

24 ЖИЗНЬ В ГАЛАКТИКЕ

ОДИНОКИ ЛИ МЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ?

Уже давно люди задумывались о возможности того, что где-либо еще во Вселенной существует разумная жизнь. Большинство предположений относилось к Луне и другим телам нашей солнечной системы, особенно к Марсу и Венере; но сейчас астрономы не считают, что на Марсе или Венере существует разумная жизнь, а на Луне — вообще какая-либо жизнь. В этой главе мы будем рассматривать разумную жизнь, так что нам придется иметь дело с пространством далеко за пределами солнечной системы, с планетными системами звезд, отличных от нашего Солнца.

Надеемся ли мы найти там разумную жизнь? Часто случалось, что человек считал, что он занимает особое место в естественной схеме природы; результаты этого, как правило, бывали бесплодными. Например, в свое время думали, что Средиземное море является центром мира. Позднее, когда была установлена шарообразность Земли, считали, что Земля расположена в центре, а Солнце и планеты движутся вокруг Земли. Затем люди поняли, что Земля является сравнительно небольшим скоплением вещества, движущимся вокруг огромного центрального Солнца; в дальнейшем мы узнали, что наше Солнце также не составляет исключения и является звездой обычного типа, движущейся вместе с миллиардами других звезд вокруг центра нашей Галактики. До последнего времени казалось, что наша Галактика больше других галактик,

но уже с первых шагов появилось сомнение в этом; в результате дальнейших астрономических исследований мы с удовлетворением узнали, что наша Галактика относится к разряду посредственных.

Из этого видно, что предположение о том, что мы не находимся в уникальном привилегированном положении, было хорошим руководящим принципом, и уже на основе одного этого принципа мы скорее склонны верить в существование другой разумной жизни во Вселенной, чем отрицать ее.

Однако в наше время убедительность этих принципов была поставлена под сомнение взглядами на происхождение планетных систем. Все знают о теории, что Земля и другие планеты образовались в результате столкновения или почти столкновения Солнца с другой звездой; рассматривались также другие возможности катастрофического происхождения; эти мнения господствовали более ста лет. Можно подсчитать, как часто происходят такие столкновения, и оказывается, что они исключительно маловероятны. Поэтому если Земля действительно возникла бы таким образом, то мы и в самом деле могли бы оказаться в одиночестве.

В настоящее время по ряду причин считается, что Земля образовалась не таким путем. Во-первых, простые расчеты показывают, что осколки, вырванные из Солнца пролетающей звездой, должны упасть обратно на Солнце. Во-вторых, трудно объяснить, почему 98% углового момента солнечной системы заключено в планетах и лишь 2% — в самом Солнце. В связи с этим были изучены возможности другого объяснения, и теперь считается, что как Солнце, так и планеты сконденсировались одновременно из некогда существовавшего газового облака. Другими словами, вместо катастрофического механизма теперь мы рассматриваем такой механизм, в котором Земля и планеты являются нормальным побочным продуктом процесса звездообразования. Мы считаем, что все звезды образовались таким путем; следовательно, планеты должны быть более или менее обычными спутниками звезд.

Мы знаем, что многие звезды двойные или даже входят в систему из еще большего числа компонент; это объясняется случайными особенностями процесса конденсации

первоначального облака. Мы считаем также, что иногда образуются звезды ненамного массивнее Юпитера, нашей самой большой планеты, и что нет принципиального различия в образовании планет и звезд.

Было обнаружено, что очень массивные звезды, сконденсировавшиеся из больших облаков газа, вращаются примерно в 50 раз быстрее, чем должно быть по сравнению с Солнцем.

Вероятно, благодаря сильному притяжению и большой протяженности центральной конденсации образовавшиеся планеты были захвачены, и полный угловой момент облака сохранился. Поэтому мы считаем, что у быстро вращающихся звезд нет планет, а у остальных — есть.

Теперь из того принципа, что мы являемся рядовыми, средними, можно сделать интересный вывод. Среди разумных обществ, которые развиваются на других планетах в Галактике, некоторые будут технологически более развиты, чем мы, и некоторые менее развиты. Но более развитые общества могут быть в действительности *гораздо* более развитыми. Достаточно лишь обратить внимание на темп технологического развития, чтобы увидеть, что оно является ускоренным, что прогресс последнего столетия превосходит прогресс предыдущих тысячелетий и что успехи, достигнутые за два последних десятилетия, превосходят успехи всего предшествующего столетия. Здесь я рассматриваю только прогресс наших знаний и прогресс в управлении нашим физическим окружением, а не успехи в области политики или морали. Трудно предсказать, что́ будет достигнуто в ближайшее столетие. Может быть, станет доступным управление погодой, будет освещено ночное небо, будет работать международное телевидение с одновременным машинным переводом, будут уничтожены болезни и т. д.

Давайте рассмотрим, что́ можно сделать для установления контакта с этими обществами? Если мы начнем исследовать ближайшие планеты, то сможем ли мы найти эти общества? Ответом может служить путешествие Колумба. Он не нашел в обеих Америках цивилизации, которая была бы более развита технологически по сравнению с Европой. Если бы там была такая цивилизация, она открыла бы Европу. В общем, когда мы начинаем исследовать,

мы открываем низшие формы: например, на Марсе мы надеемся найти лишь примитивные формы растительности. В результате этих рассуждений мы приходим к неожиданному выводу, что более развитые общества, существование которых мы постулируем, должны были открыть нас. Открыли ли они нас, были ли они здесь в далеком прошлом и, если были, оставили ли какие-нибудь знаки о своем посещении? Эти вопросы мы сейчас рассмотрим.

ГАЛАКТИЧЕСКИЙ КЛУБ

Поскольку в нашей Галактике около миллиарда звезд, планет должно быть около 10 миллиардов, если астрономы правы, считая, что звезды, подобные Солнцу, обычно имеют планеты. Не все из них будут обитаемы, некоторые будут слишком горячи или слишком холодны в зависимости от их расстояния до центральной звезды; поэтому мы должны обращать внимание только на планеты, расположенные так же, как наша Земля относительно Солнца. Будем называть такое положение «положением в зоне обитаемости».

Это не означает, что вне зоны обитаемости не может быть жизни. Могут существовать живые формы, приспособленные к очень тяжелым физическим условиям; часто высказывались предположения, что некие экзотические формы жизни могут быть основаны на химии атомов кремния вместо атомов углерода, на которых основана земная жизнь. Но углерод является довольно распространенным атомом во всей наблюдаемой Вселенной, так что мы можем с уверенностью предполагать, что бóльшая часть живых существ использует богатейшие химические свойства молекул, содержащих углерод. Однако образ жизни каких-нибудь кремниевых существ был бы весьма экзотическим. Вместо того чтобы выдыхать углекислый газ, как делаем мы, они выдыхали бы двуокись кремния, т. е. песок.

Исключив замерзшие планеты и планеты, стерилизованные жарой, мы получим, что в Галактике имеется около 10^{10} (десять тысяч миллионов) подходящих для жизни планет. Мы также исключаем планеты двойных звезд, так как не считаем, что такие планеты будут оставаться на устойчивых круговых орбитах и в условиях

достаточно постоянной температуры, а для развития организмов требуются миллионы лет.

Мы не знаем точно, на каких из 10^{10} подходящих планет имеется разумная жизнь. Поэтому мы изучим все возможности, начиная с того, что разумная жизнь широко распространена и имеется практически на любой подходящей планете. В этом случае среднее расстояние между двумя разумными обществами равно 10 световым годам. Для сравнения напомним, что ближайшая звезда любого типа находится на расстоянии около 1 светового года.

Десять световых лет — это очень большое расстояние. Радиосигнал пройдет это расстояние за 10 лет, и любому сигналу, в свете современных данных, требуется не меньше времени. Поэтому связь с кем-нибудь на расстоянии 10 световых лет не будет похожа на телефонный разговор с его быстрыми вопросами и ответами. Это будет вообще не разговор, а скорее двусторонний поток информации. Лучше рассматривать его как контакт между обществами, а не между отдельными личностями, так как жизнь отдельного человека слишком коротка.

Но прежде чем это обсуждать, можно спросить: «Уверены ли мы в том, что сможем послать радиосигнал на 10 световых лет?» На этот вопрос можно ответить вполне определенно. Мы уверены, что само космическое пространство не представляет преграды для распространения радиоволн, так как мы уже принимали радиоволны с гораздо бóльших расстояний — не сигналы разумного происхождения, а естественное излучение «радиозвезд». На основании имеющихся данных уже ясно, что связь на расстоянии 10 световых лет возможна на базе современной радиотехники, если применять очень мощные передатчики, весьма чувствительные приемники и очень большие антенны типа известных больших радиотелескопов.

Как установить первый контакт? Прежде всего мы должны считать, что бессмысленно пытаться связаться с обществами, технологически менее развитыми, чем наше. Например, если у них нет радио, то радиометод отпадает. Но мы сами имеем радио лишь несколько десятилетий, так что любое общество, которое отстает от нас, вряд ли заинтересуется нами сейчас. С другой стороны, общества, опередившие нас, вероятно, находятся далеко впереди,

поскольку темп технологического развития ускоряется. Далее, не следует думать, что если мы вступим с кем-нибудь в контакт, то это будет первый случай за все время. Такие события могли происходить много раз в прошлом, так что даже в то время, когда пишутся эти строки, в Галактике может существовать целая цепь линий связи между обществами, уже прошедшими ту ступень развития, на которой мы находимся. Более того, они имеют опыт в обнаружении возникающих обществ типа нашего и в вовлечении их в цепь линий связи.

Следовательно, не мы будем устанавливать с ними контакты. Они будут это делать, мы должны быть готовы принять их сигналы. Этот вывод является обоснованием американского проекта «Озма», предназначенного для того, чтобы выяснить, не предпринимаются ли попытки установить с нами контакт с помощью мощных радиопередатчиков с двух соседних звезд — ε Эридана и τ Кита. 25-метровый радиотелескоп обсерватории Грин Бэнк (Западная Виргиния) был направлен на эти звезды в течение месяца, однако даже если кто-то и передавал в нашу сторону сигналы в это время, первая попытка принять такие сигналы не дала результата.

Итак, разыгрывается очень интересная игра-загадка, в которой мы зависим от превосходящих сил другого игрока (в данном случае от большей мощности его радиопередатчика) и пытаемся угадать, что́, по его мнению, мы будем делать, когда достигнем стадии предположений о его существовании. Мы еще не вступили в такой контакт, но я верю, что мы находимся на пороге вступления в галактическую систему связи.

Далее мы рассмотрим вопрос о том, был ли проект «Озма» правильным шагом и можно ли сделать что-либо еще.

ЯВЛЕНИЕ ЖИЗНИ

Мы видели, что условия, подходящие для разумной жизни, по-видимому, распространены в нашей Галактике; главный пробел в наших сведениях заключается в том, что мы не знаем, развилась ли жизнь на тех планетах, где условия благоприятны. Однако нет причин сомневаться в том, что это может произойти где-либо еще, если

произошло у нас, на Земле. Среди других обществ некоторые будут технологически более развиты, чем мы, некоторые меньше; и если мы надеемся когда-либо установить контакт с другими обществами, то другие уже могли это сделать и создать сеть линий связи, существующую и сейчас.

Если они так развиты, будут ли они интересоваться нами? Конечно, некоторые разумные общества могли выработать некое подобие философии йоги и проводить свое время только в размышлениях. Другие, может быть, решили все интересующие их проблемы и теперь просто смотрят телевизоры. Нам лучше ограничиться здесь такими обществами, которые не потеряли научной любознательности к Вселенной, в которой они живут.

Кроме того, высказывались предположения о том, что следует проявлять осторожность в контактах с другими цивилизациями, так как якобы им потребуется золото или другие ценные минералы, которые имеются у нас, либо они просто захотят использовать нас для бифштексов. Но я не думаю, что риск столь велик в связи с огромной стоимостью транспортировки материальных объектов на межзвездные расстояния. Несомненно, гораздо дешевле синтезировать мясо из составляющих его элементов либо стать вегетарианцами, чем импортировать мясо с другой звезды. Для вывода даже очень маленьких предметов из «гравитационного колодца» Земли необходимы чрезвычайно большие ракеты.

Наиболее интересным видом груза для передачи с одной звезды на другую является информация; ее можно передать по радио. Мне кажется, что информация, которую мы можем предоставить, будет ценной для некоторых других научных обществ. В конце концов посылаем же мы экспедиции в труднодоступные места для их исследования и планируем экспедиции на Луну! Но в наших экспедициях нам приходится добывать необходимую информацию путем трудоемких наблюдений. Насколько богаче будет добыча незнакомцев, исследующих нашу Землю, если они получат полный доклад о природе нашей планеты! Насколько ценнее для нас были бы антарктические экспедиции если бы пингвины вели записи погоды!

Какими могут оказаться другие люди? Для хода наших рассуждений это знать необязательно. Мы можем договориться рассматривать такие общества, которые больше преуспели в управлении своим физическим окружением, чем мы. Это условие можно раскрыть достаточно определенно. Мы предполагаем, что они уже имеют возможность запускать ракеты со своих планет, посылать радиоволны, взрывать атомные бомбы и понимать все те явления, которые люди на Земле уже постигли.

И все же хорошо бы представить себе внешний облик этих существ. Они могут отличаться от нас, как динозавры или дельфины, или, допуская еще бóльшую крайность, можно представить их похожими на муравьев или москитов или даже на бактерии.

Иногда утверждают, что развитию человека как животного, использующего орудия труда, во многом способствовало обладание руками и цепкими пальцами и что собаки, например, были поставлены в худшие условия из-за неспособности поднять палку и использовать ее как оружие или инструмент. Но мне кажется, что мозг имеет большее значение и что другие разумные существа могут не только обойтись без рук, но и выглядеть весьма необычно. Конечно, нам трудно представить себе живые существа, которые совершенно непохожи на что-либо, уже виденное нами. В отличие от всего, что мы знаем, обитатели одной из других планет могут быть сферическими, как мячи, приняв такую форму из-за особенностей физических условий окружающей среды. Вместо того чтобы брать предметы руками, как это делаем мы, они могут заглатывать их и манипулировать ими, например, при помощи языка. Может быть, их языки будут светящимися, а во рту на нёбе будет глаз или микроскоп. Такие предположения могут показаться неправдоподобными, но можно не сомневаться в том, что факты окажутся не менее странными.

Основной особенностью в вопросе о будущих контактах с высокоразвитыми обществами является то, что они овладели методами управления окружающими их физическими условиями, поняв их так же, как это делаем мы на Земле. Это единственный вид обществ, находящихся на межзвездных расстояниях, с которыми мы надеемся установить

контакт; в свое время мы сможем информировать друг друга о своем физическом строении. Однако по сравнению с потоком более существенных знаний о Вселенной это будет не самой важной частью в обмене информацией. Наше управление природой зависит от понимания ее явлений; например, возможность исследовать внутренние органы человека при помощи рентгеновских лучей и принимать необходимые меры для сохранения здоровья зависит от наших знаний об электронных пучках и строении атома. Так что вполне понятно, что получение новой информации с более развитой планеты будет громадным сдвигом в культуре человеческой расы.

Никто не знает, какова наша роль как биологического явления во Вселенной; вполне возможно, что мы должны будем принять участие в развитии большего, общегалактического масштаба. Жизнь как существующее в Галактике явление может иметь значение более чем мимолетное, и разум в конечном счете может научиться управлять эволюцией Галактики. Люди уже изменили лицо Земли, что мы можем увидеть при полете над Землей; вскоре наше влияние распространится на Луну, Марс и Венеру.

Пределы, к которым, по мнению некоторых ученых, приближается явление жизни в изменении своего окружения, иллюстрируются Дайсоном. Он утверждает, что мы превращаем неорганическое вещество Земли в живую протоплазму и не остановимся до тех пор, пока не исчерпаем всю Землю и всю энергию, приходящую от Солнца.

ЗОНДЫ — ВЕСТНИКИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Хотя имеются основания считать, что мы не одни в Галактике и что существуют другие общества, по сравнению с нами в большей степени овладевшие методами управления окружающей их средой, мы не знаем, насколько удалено от нас ближайшее такое общество. Если такая жизнь широко распространена, то ближайшая цивилизация может существовать на расстоянии около 10 световых лет. В таком случае радио является хорошим средством установления контактов, и попытки принять

такие сигналы от ε Эридана и τ Кита уже предпринимались.

Однако если жизнь меньше распространена и ближайшее опередившее нас в развитии общество находится на расстоянии, скажем, 100 световых лет, тогда положение меняется. Установить контакт будет намного труднее, хотя после того как контакт будет установлен, радиосвязь окажется возможной. Трудность состоит в том, что неизвестно, куда направлять радиосигналы. В сферическом объеме радиусом 100 световых лет содержится около тысячи одинаково подходящих звезд, что затрудняет наш выбор. Более того, другая сторона должна выбирать из тысячи равновероятных для себя кандидатов. Очевидно, что вероятность того, что мы ожидаем в их направлении сигналы в то время, когда они приходят в нашем направлении, оставляет мало шансов на успех. Поэтому мне кажется, что более эффективным был бы некий другой метод, особенно в связи с тем, что после того, как такой сигнал принят, ответ придет с задержкой по крайней мере в 200 лет, что кажется весьма рискованным способом установления связи.

Для того чтобы определить правильное направление дальнейших действий, мы можем рассмотреть наши собственные планы. Как известно, уже отправлены космические зонды к Венере и Марсу.

Разрабатываются планы полетов к Юпитеру и дальше, испытывается несколько типов двигателей с малой тягой, пригодных для продолжительных многолетних путешествий. Не исключено, что к концу этого столетия космический зонд сможет отправиться за пределы солнечной системы к ближайшей звезде. Такой полет займет очень много времени, так что при жизни тех, кто запускал этот зонд, с него еще не будет получена полная информация. Хотя практически нет проектов, которые планировались бы настолько заблаговременно, мы должны создать долгосрочные проекты в связи с исследованиями звезд. И мне кажется, что для интересного проекта найдутся необходимые финансовые средства.

По пути зонд сможет передать разнообразные сведения об условиях в межзвездном пространстве, но сейчас мне хочется обратить внимание на один хороший и чрезвычайно простой эксперимент, который можно было бы провести при помощи зонда по прибытии к месту назначения. Предположим, что при помощи дополнительной ракеты зонд был выведен на орбиту вокруг далекой звезды. Тогда он смог бы попытаться обнаружить присутствие технологической цивилизации, слушая радиостанции. Чтобы сделать это, не нужно знать, где находятся планеты; можно надеяться, что за несколько лет зонд пройдет достаточно близко от одной из планет и уловит радиоволны, посылаемые из нее. Трудно придумать более простой и однозначный эксперимент для определения существования разумной жизни. Полностью отпадает проблема создания сложного оборудования для обнаружения планеты и создания массивных ракет, необходимых для сближения и посадки на нее.

Что произойдет, если ракета обнаружит существование радиосвязи? Она сможет сигнализировать на Землю. Но ее действия могут быть и более эффективными. Ракета может оповестить о своем существовании, посылая назад некоторые сигналы, подобные тем, которые она перехватила, на той же волне. Легко сообразить, что абонент, принимающий первоначальную передачу, обнаружит нечто вроде эха.

Целью нашего отступления, посвященного собственным планам, было помочь найти возможные мероприятия, при помощи которых можно было бы привлечь наше внимание к существованию галактической системы обществ, ближайшее из которых так далеко, что первый прямой радиоконтакт кажется невозможным. Мое предложение заключается в том, что на тысячу окружающих нас звезд могут быть посланы зонды-вестники. Возможно, один из них уже сейчас находится в нашей солнечной системе; если так, то мы должны быть очень внимательными, чтобы не проглядеть необъяснимые радиосигналы, которые могут быть приняты. Существует большая опасность такого упущения, так как радиооператоры и другие потребители радиоспектра работают слишком селективно. Было бы чрезвычайно интересно принять первое сообщение извне.

Ввиду большого неудобства 200-летней задержки при прямой связи на расстоянии 100 световых лет было бы очень ценно снабдить зонд-вестник большим количеством

информации, которую он сможет передать любому слушателю, с которым установит контакт. В свете современного и предполагаемого развития вычислительных машин и методов их миниатюризации не будет большим преувеличением предположение о том, что вычислительная машина размерами с человеческую голову способна содержать огромное количество информации. Разумно предположить, что путем соответствующего программирования можно будет выработать способы общения с разумными существами. Если мы обратимся к возможностям бионики, которой пока даже не касались, то может оказаться, что какое-нибудь далекое общество выведет породу «космических вестников»—мозга без тела и конечностей, хранящего традиции своего общества — в большинстве они будут рассеиваться бесполезно, но некоторые окажутся орудиями распространения общегалактической культуры. Такой метод может оказаться неприемлемым для нас; мы предпочли бы изготовить подобный мозг из неодушевленной материи при помощи методов микроминиатюризации, которые предоставляет нам молекулярная электроника. Мне кажется, что зонд, встреченный на межзвездных расстояниях от места его создания, должен быть набит информацией и обладать способностью разумно отвечать на вопросы.

Может оказаться, что 100 световых лет — заниженная оценка расстояния до ближайшего более развитого общества; в этом случае, я полагаю, контакты будут осуществляться между зондами — вычислительная машина одной планеты общается с вычислительной машиной другой. Для нас, людей, эта мысль несколько неприятна. Я представляю себе, как такие зонды запускаются со своей планеты во всех направлениях, устанавливают время от времени контакты с другими планетами, сообщают об этом «домой» и, наконец, их планеты вступают в непосредственную связь. Ослабление сигнала на таких больших расстояниях не создает непреодолимые трудности, если контакт установлен, так как релейный принцип, уже применяемый в трансокеанских кабелях и телефонных линиях, может быть использован и в космическом пространстве.

Если же наш ближайший сосед находится на расстоянии 1000 световых лет, то ситуация меняется. Это означает, что во всей Галактике имеется лишь около 2000 развитых обществ или только одно общество на десять миллионов подходящих планет; из этого факта следует удивительный вывод. Мы не знаем, сколько времени потребуется для того, чтобы жизнь на другой планете достигла технологического уровня, но мы знаем, что на Земле для этого понадобилось около тысячи миллионов лет. Допустим, что так будет везде. Тогда на большинстве из десяти тысяч миллионов планет, похожих на Землю, не будет существовать ничего, кроме примитивных микробов, которым еще предстоят миллионы лет эволюции. Когда, наконец, они достигнут нашего технологического уровня, технология на них будет развиваться в течение примерно, скажем, 500 лет; при таких обстоятельствах в любой данный момент в таком развитии будет одна из 10 миллионов подходящих планет. Всего их будет около 2000, рассеянных по Галактике; отсюда можно определить, что расстояние до ближайшего более развитого общества составит около 1000 световых лет. Следовательно, если верно, что технологически развитые общества настолько редки, что до ближайшего развитого соседа 1000 световых лет, то такую редкость можно объяснить отсутствием живучести технологических цивилизаций. Это будет означать, что продолжительность их жизни составляет 500 лет после нашей ступени развития. Вы, разумеется, заметили, что при этом у нас не будет времени даже для одного двустороннего обмена, так как наше общество перестанет существовать прежде, чем придет ответное сообщение, так что мы никогда не сможем вступить в общегалактический клуб.

Грустно подумать о том, что, потратив так много лет на то, чтобы достигнуть познания окружающей Вселенной и научиться частично управлять ее силами, технологически развитые общества могут исчезать со скоростью одно-два общества в год в различных частях Галактики, так и не узнав своих соседей.

Гибель живущих обществ может происходить по многим естественным причинам, главным образом в связи с большой шкалой времени геологических изменений. Например, климат может, в конце концов, настолько ухудшиться, что станет совершенно невыносимым для

современного общества. Можно также представить себе короткое время жизни в том случае, если окажется, что развитие технологии содержит в себе зачатки разрушения. К сожалению, в настоящее время слишком очевидно, в чем могут заключаться эти зачатки.

Сейчас, вероятно, все зависит от того, сумеем ли мы стабилизировать политическую ситуацию; ясно, что достижение такой стабильности на достаточно большой период времени является необходимым условием образования галактической системы обществ и вступления в нее.

Р. Брейсуэлл

25 СИГНАЛЫ ВЫСОКОРАЗВИТЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ

После того как Моррисон и Коккони [1] опубликовали свое предположение о том, что в Галактике могут быть высокоразвитые общества, превосходящие нас в технологическом развитии и передающие нам сигналы на частоте 1420 *Мгц*, Дрейк [2] описал аппаратуру, создающуюся для поиска таких сигналов. Идея подобных наблюдений основана на уверенности в том, что планеты являются обычным побочным продуктом в процессе образования звезд. На это указывает, в частности, тот факт, что звезды спектрального класса, более позднего, чем F5, подобно Солнцу имеют малый угловой момент, а в случае Солнца мы знаем, что почти весь момент (98%) сосредоточен в планетах [3]. Трудно предположить, что среди миллиардов планет в Галактике, расположенных относительно своей звезды подобно Земле, многие не имеют более развитых цивилизаций по сравнению с нашей. В связи с ускорением темпа технологического развития эти цивилизации должны достичь чрезвычайно высокого уровня.

Даже простая проверка этой возможности имела бы большое значение. Дрейк предполагает исследовать τ Кита и ε Эридана. Если из списка подходящих соседних звезд, составленного Моррисоном и Коккони, исключить двойные звезды, то останутся две эти звезды, а также ε Индейца. Считается, что из-за возмущений орбит планеты двойных звезд, за некоторым исключением, не могут

обладать ровным климатом на протяжении геологических эпох, что считается необходимым условием эволюции [4].

Но правы ли мы, считая, что на ближайшей из тех звезд, которые мы в настоящее время не можем определенно исключить, находится высокоразвитая цивилизация? Если только высокоразвитые цивилизации не являются чрезвычайно распространенными, то не будет ли более вероятным, что ближайшая цивилизация расположена по крайней мере в десять раз дальше, скажем на расстоянии более 100 световых лет? Допустим, что в радиусе, равном расстоянию до ближайшей высокоразвитой цивилизации, находится тысяча подходящих звезд. Тогда нам трудно будет выбрать нужную звезду. Далее, если это развитое общество ищет нас, то мы можем рассчитывать обнаружить его только в том случае, если оно затрачивает усилия для исследования тысячи подходящих звезд, находящихся на таком же расстоянии от него. Маловероятно, что такое общество будет иметь тысячу передатчиков с мощностями, намного превосходящими 1 *Мвт* (это значение вычислено Дрейком в качестве минимума для передачи на расстояние всего 10 световых лет), и будет передавать сигналы в течение многих лет; вряд ли мы можем рассчитывать на то, что такая цивилизация обратит на нас особое внимание. Надо учесть, что на протяжении большей части миллиардов лет существования Земли такое оказание внимания было бы бесполезным.

С другой стороны, не может ли случиться так, что это более развитое общество занимается тем, что мы здесь обсуждаем и собираемся делать, возможно, в этом столетии, а именно посылает сигналы к соседним звездам? Исследования и другие виды деятельности, осуществляемые таким обществом, наиболее активны на ближайших к нему планетных системах. За пределы ближайших окрестностей эти разумные существа, вероятно, могут разослать к некоторому числу подходящих звезд, скажем к тысяче, сравнительно скромные зонды. Каждый зонд может быть выведен на круговую орбиту вокруг одной из тысячи звезд на расстоянии в пределах зоны подходящей для жизни температуры. Защищенные от метеоритов и радиационного воздействия, питаемые энергией звезды, зонды могут иметь долговечные радиопередатчики для привлечения внимания цивилизаций типа нашей.

При помощи этого плана наши предполагаемые более развитые соседи смогут создать у нас более сильный сигнал, чем при помощи своих передатчиков, сигнал которых подвержен ослаблению обратно пропорционально квадрату межзвездного расстояния. Они смогут также избавиться от неопределенности, связанной с нашей неспособностью выбрать правильную звезду и правильную длину волны.

По этой причине, может быть, нам лучше сосредоточить свои усилия на тщательном обследовании нашей солнечной системы в поисках подобных зондов, присланных нашими более развитыми соседями. В этом случае фактически мы обращаем внимание на все разумные общества, для которых мы досягаемы. Однако мы не должны надеяться на то, что любое общество, кроме ближайшего к нам, будет пытаться установить с нами контакт, так как высокоразвитые цивилизации во всей Галактике, возможно, уже связаны в единую общегалактическую систему связи и будут действовать согласованно и избегать дублирования поисков. Наш предстоящий контакт нельзя считать единственным в своем роде; скорее это будет наше присоединение к системе высокоразвитых цивилизаций, которые имеют длительный опыт в установлении контактов со вновь возникающими обществами, подобными нашему.

Для того чтобы представить себе, каким образом высокоразвитые общества могут обнаружить нас, посмотрим, что́ мы могли бы сделать, чтобы обнаружить их. Очень хорошим первым проектом для нас в эпоху, когда мы начнем проникать за пределы солнечной системы, был бы поиск признаков технологического развития в системах τ Кита и ε Эридана при помощи зонда, который должен прослушивать, существует ли там монохроматическая радиосвязь, и сообщать об этом при помощи межзвездной ретрансляции. Мы узнали бы, имеется ли в этих «солнечных» системах линейчатый спектр радиоизлучения, подобный тому, который излучает сейчас Земля. В принципе возможно, что гипотетические датчики, высланные в большом количестве ближайшим к нам высокоразвитым обществом, ограничиваются лишь прослушиванием этого излучения. В этом случае положительный ответ, может быть,

уже находится на пути к своей звезде в течение нескольких десятилетий, и мы можем рассчитывать на прибытие через соответствующий промежуток времени более полной экспедиции.

Однако поскольку перенос материальных предметов на межзвездные расстояния требует огромного времени и передача информации в любом случае будет иметь большее значение, то усилия по посылке подобного зонда в нашу солнечную систему будут оправданы лишь в том случае, если посланный к нам самый первый зонд будет содержать достаточно обширный запас информации и сложную вычислительную машину, с тем чтобы он мог не только обнаружить наше присутствие, но и переговариваться с нами. Такой зонд может уже сейчас находиться здесь, пытаясь сообщить нам о своем присутствии. Для этой цели, вероятно, необходим радиопередатчик. На какой волне он будет работать и как нам расшифровать его сигнал? Для того чтобы выбрать волну, которая может проникнуть сквозь ионосферу и которая в то же время расположена в используемом нами диапазоне, зонд может вначале прослушать наши сигналы, а затем послать их назад. Для нас сигналы зонда будут напоминать эхо с задержками в секунды или минуты типа тех сигналов, о которых 30 лет назад сообщали Штёрмер и ван дер Поль [5] и которые так и не получили своего объяснения.

Чтобы уведомить зонд о том, что мы его услышали, мы должны будем повторить сигнал снова. Так он узнает, что вступил в контакт с нами. После нескольких контрольных проверок с целью гарантии от случайностей и для выяснения нашей чувствительности и полосы пропускания он может начать передачу своего сообщения с последующими периодическими остановками для контроля того, что он не ушел за наш горизонт. Не удивительно, если началом его сообщения будет телевизионное изображение какого-нибудь созвездия.

Эти подробности, а также проблема обучения зонда нашему языку (путем передачи словаря в картинках?) достаточно интересны, но не должны вызвать особых затруднений, если будет установлен контакт с зондом. Последнее является главной проблемой. Для нас важно быть готовыми к возможности того, что неожиданные

сигналы будут иметь межзвездное происхождение. Мы не должны допустить, чтобы эти сигналы, если они будут передаваться, постигла судьба очень сильного излучения Юпитера (порядка 1000 *Мвт/Мгц*), которое мы слышали и игнорировали в течение десятилетий [6].

Если после нескольких лет пристального внимания мы не найдем каких-либо (радио- или других) признаков присутствия такого зонда, то мы должны будем допустить возможность того, что ближайшее к нам высокоразвитое общество находится за пределами того расстояния, на котором попытки установить с нами контакт имеют большие шансы на успех.

Для того чтобы исследовать возможность существования высокоразвитого общества на расстоянии, позволяющем достичь нас, рассмотрим рис. 1, на котором показано число высокоразвитых обществ в Галактике N_C в зависимости от расстояния до ближайшего высокоразвитого общества d в световых годах. Этот график получен из пунктирной кривой, которая изображает N — число подходящих звезд на расстоянии меньше d. Под подходящими звездами я подразумеваю те 10^{10} звезд, составляющие около 5% общего числа звезд в Галактике [4], которые в настоящее время нельзя считать непригодными для существования жизни. Наша кривая основана на модели галактического распределения массы и не может претендовать на точность выше порядка величины.

Что следует из полученной таким образом оценки $N_C = 10^7$? Тогда d равно 100 световым годам, и число подходящих звезд в этом радиусе составляет 10^3. Вероятность существования высокоразвитых обществ на подходящих звездах p равна 10^{-3}. Хотя у нас нет доказательств существования разумной жизни где-либо кроме Земли, все-таки, если принять, что для возникновения одного высокоразвитого общества на подходящей звезде требуется $5 \cdot 10^9$ лет и затем это общество существует в среднем в течение Δ лет, то $p = 10^{-3}$ означает, что Δ равно $5 \cdot 10^6$ лет в предположении, что наш мир не подвергнется катастрофическим изменениям. Это дает, по-видимому, вполне достаточно времени для исследования всех 10^3 звезд в радиусе 100 световых лет и для установления системы связи.

Предположим теперь, что технологические цивилизации в нашей Галактике малочисленны, например примем $N_C = 10^3$. Тогда $p = 10^{-7}$, $N_L = 10^7$, $d = 2000$ световых лет и $\Delta = 500$ лет. Таким образом, существование обществ,

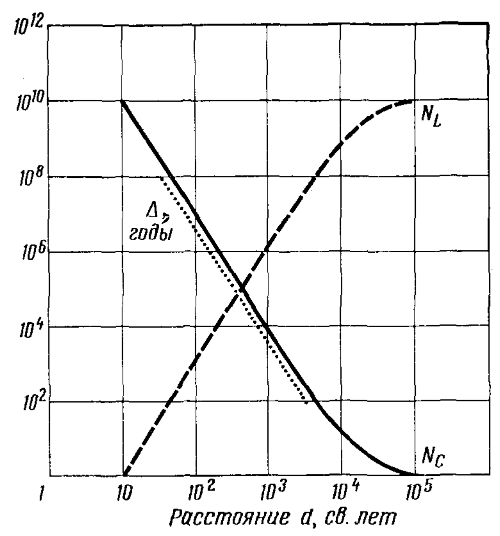


Рис. 1. N_c — полное число передатчиков в Галактике, принадлежащих технологически более развитым обществам, чем наше; N_L — полное число подходящих звезд на расстоянии d; Δ — средняя продолжительность времени, в течение которого общества интересуются проблемой межзвездной связи.

которые возникают с вероятностью лишь 10^{-7}, в среднем слишком непродолжительно для того, чтобы осуществлять межзвездные связи.

Если разумная жизнь на других подходящих системах развивается такими же темпами, какими развивалась наша, и если какое-то высокоразвитое общество не установило с нами контакта, то это может быть просто следствием того, что частота гибели развитых цивилизаций слишком высока и потому они не могут быть многочисленными в Галактике. Но даже в этом случае поражает тот факт, что в любой момент в Галактике существует тысяча высоко-

развитых обществ, несмотря на то что требуется 5 миллиардов лет для возникновения технологически развитого общества, которое будет интересоваться межзвездной связью в среднем лишь 500 лет после того момента, когда их уровень будет равен нашему.

Даже в том случае, когда технологические цивилизации редки, все же имеется возможность существования системы связи. Так, в Галактике, содержащей лишь 10^3 высокоразвитых обществ с коротким ожидаемым временем жизни, могут существовать отдельные общества, которые достигли долговечности. Благодаря случайной близости из-за хаотического распределения в пространстве некоторые из них могут установить между собой контакт. Вероятно, такая древняя ассоциация будет обладать бо́льшими техническими возможностями и окажется в состоянии обнаружить нас при помощи специальных средств, о которых мы можем и не догадываться. Будут ли они интересоваться примитивными обществами, которые, по их опыту, обычно должны уничтожить себя прежде, чем их можно будет обнаружить и установить с ними контакт, сказать трудно. Такие общества будут исчезать со скоростью две цивилизации в год (10^3 за 500 лет), и, может быть, эта ассоциация уже удовлетворила свое любопытство путем археологических исследований, которые ее члены не спеша провели в своей окрестности. С другой стороны, перспектива застать технологическое общество в его расцвете может оказаться для высокоразвитых цивилизаций достаточно сильным стимулом для усилий, направленных на то, чтобы установить с нами контакт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cocconi G., Morrison P., Nature, **184**, 844 (1959).
2. Drake F. D., Sky and Telescope, **19**, 140 (1959).
3. Struve O., Sky and Telescope, **19**, 154 (1960).
4. Huang S.-S., Am. Scientist, **47**, 397 (1959).
5. Störmer C., Nature, **122**, 681 (1928); Van der Pol B., Nature, **122**, 878 (1928). Дальнейшее обсуждение см.: Budden K. G., Yates G. G., J. Atmos. Terr. Phys., **2**, 272 (1951).
6. Burke B. F., Franklin K. L., J. Geophys. Res., **60**, 213 (1955); Shain C. A., Australian J. Phys., **9**, 61 (1956).

26 ПОИСКИ СИГНАЛОВ ОТ ДРУГИХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ [1]

При поисках разумных сигналов от источника внеземного происхождения мы должны руководствоваться двумя оценками: 1) возможной природы таких сигналов и 2) расстояния, с которого они могли бы прийти. Мы не можем искать что-то, не составив себе по крайней мере грубого представления о том, чтó мы ищем, и мы не можем обнаружить объект, если диапазон наших методов восприятия слишком узок. Настоящая статья касается в большей степени расстояния. Однако, проводя такие оценки, нельзя делать какие-либо утверждения о других цивилизациях; следует руководствоваться исключительно рабочими гипотезами, которые могли бы направлять поиск.

Так как мы не располагаем какими бы то ни было знаниями о других цивилизациях, мы должны полностью положиться на предположения. Мы хотим сделать одно важное предположение, которое может быть сформулировано следующим образом:

То, что кажется нам уникальным и необычным, в действительности является типичным и, возможно, рядовым. (1)

Для демонстрации эффективности этого метода укажем, что даже древние греки могли бы оценить расстояние

[1] Теоретико-вероятностный анализ проблемы межзвездной связи, выполненный С. Хорнером в данной главе, несмотря на его методический интерес, является во многих отношениях спорным и ограниченным. Советский читатель, без сомнения, отметит крайнюю пессимистичность взгляда Хорнера на «возраст технологической цивилизации». По меткому замечанию советского астрофизика И. С. Шкловского, «чувствуя зыбкость того мирка, в котором он живет, западногерманский профессор неизбежную гибель этого мирка переносит на все человечество». — *Прим. ред.*

от Солнца до Земли и даже расстояния между соседними звездами, если бы они просто применили приведенное выше положение к Земле, предположив, что она является рядовой планетой, и к Солнцу, предположив, что оно является рядовой звездой. Они должны были считать, что Земля имеет средние значения таких величин, как диаметр, альбедо и расстояние от Солнца; сравнение же средней видимой яркости пяти известных планет с яркостью Солнца вместе с известной им величиной диаметра Земли дало бы им расстояние до Солнца, которое было бы лишь вдвое больше истинного. Они должны были предположить, что Солнце имеет среднее значение абсолютной яркости; сравнение средней видимой яркости десяти ярчайших звезд с яркостью Солнца вместе со значением расстояния до Солнца, определенным ранее, дало бы расстояние между соседними звездами, которое бы было меньше истинного на пять процентов.

Все что необходимо сделать вначале при таком подходе — это осуществить правильную классификацию и знать одно абсолютное значение (в вышеприведенных примерах — диаметр Земли).

Окончательная оценка может быть, конечно, и совершенно неверной, но вероятность того, что она неверна, очень мала, а вероятность того, что результат будет правильным, высока.

Основное предположение нашей статьи следующее: наша планетная система и наша цивилизация являются более или менее рядовыми, и жизнь, и в том числе разумная, будет развиваться по тем же самым законам естественного развития везде, где имеются соответствующее окружение и необходимое время. Это включает предположение, что рядовая цивилизация достигнет современного земного уровня разумных интересов или умственной деятельности (наука, техника, поиски межзвездных сообщений) по истечении примерно такого же отрезка времени, который пройден человечеством, и встретит примерно те же самые трудности, что и мы.

Однако мы должны также предположить, что наш уровень умственной деятельности — только один из многих возможных и что в будущем он будет зависеть от других интересов и действий.

РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ЦИВИЛИЗАЦИЯМИ

Согласно нашим предположениям, все последующие величины являются средними в пределах сферы вокруг Солнца радиусом в 1000 *парсек* [1]). Обозначим через ν_0 ту часть всех звезд, которая имеет планеты, где может развиваться жизнь, T_0 — время, необходимое для развития технологической цивилизации (определяемой, например, наличием высокоразвитой радиотехники), l — возраст технологической цивилизации [1], T — возраст самых старых звезд и через ν — ту часть всех звезд, которые в настоящем имеют технологическую цивилизацию. Если мы предположим для нашей цели, что скорость образования звезд постоянна за все время T, то тогда имеем

$$\nu = \begin{cases} \nu_0 (T - T_0)/T & \text{при} \quad l \geqslant T - T_0, \\ \nu_0 (l/T) & \text{при} \quad l \leqslant T - T_0. \end{cases} \tag{2}$$

Если мы обозначим через D_0 среднее расстояние между соседними звездами, то среднее расстояние между соседними технологическими цивилизациями D определится выражением

$$D = D_0 \nu^{-1/3}. \tag{3}$$

Для того чтобы получить средний возраст l, мы должны рассмотреть некоторые детали. Принимаем следующие пять возможностей, которыми может быть ограничена долговечность технической цивилизации (или ее техническая умственная деятельность): первая — полная гибель всего живого; вторая — гибель только сознательной жизни; третья — физическое или умственное вырождение и вымирание; четвертая — потеря интереса к науке и технике и пятая — неограниченное развитие. Во втором и третьем случаях на той же самой планете могла бы развиться другая цивилизация, не изолированная от низших форм жизни, и мы предполагаем, что время, необходимое для такого возврата, мало по сравнению с T_0. Теперь мы назовем $l_1, \ldots l_5$ средними продолжительностями

[1]) 1 *парсек* = 3,26 светового года = $3{,}086 \cdot 10^{18}$ *см* = $= 1{,}95 \cdot 10^{13}$ мили.

жизни в пяти вышеприведенных возможных случаях и $p_1, \ldots p_5$ — вероятностями того, что они произойдут. Если $l_1, \ldots l_4 \leqslant T - T_0$, то имеем

$$\nu = \nu_0 \left\{ \left(\frac{p_1 l_1}{T}\right) + \ldots + \left(\frac{p_4 l_4}{T}\right) + \frac{p_5 (T - T_0)}{T} \right\} \times \\ \times [1 + (p_2 + p_3) + (p_2 + p_3)^2 + \ldots], \tag{4}$$

или

$$\nu = \nu_0 Q \frac{l}{T} \tag{5}$$

при средней продолжительности l, определяемой как

$$l = \sum_{i=1}^{4} p_i l_i + p_5 (T - T_0), \tag{6}$$

и факторе повторяемости Q, определяемом

$$Q = \frac{1}{1 - (p_2 + p_3)} . \tag{7}$$

Другим интересным вопросом является следующий: на какой ступени развития наиболее вероятно встретить первые цивилизации? Обозначим через t время от начала их технической фазы (определяемой высокоразвитой радиотехникой) до настоящего времени. Вероятность того, что первые цивилизации, с которыми мы войдем в контакт, будут принадлежать группе i, равна $P = \nu_i/\nu$, и их средний «технологический возраст» к моменту контакта равен $t_i = l_i/2$. Тогда наиболее вероятная величина их технологического возраста равна

$$t = \sum P_i t_i = \frac{\Sigma p_i l_i^2}{2l} . \tag{8}$$

Вероятность же того, что прежде них на той же планете были другие цивилизации, равна

$$p_r = p_2 + p_3 = \frac{Q - 1}{Q} . \tag{9}$$

До сих пор анализ был достаточно честным. Но как только мы начинаем принимать численные значения для средней продолжительности l_i и для вероятности каждого случая p_i из перечисленных выше возможностей,

то он становится делом индивидуального мнения. В качестве реабилитации своих расчетов я упомяну два довода. Первый — нельзя проектировать определенную приемную систему без некоторых оценок подобного рода. Второй — неопределенность в значении l входит в (3) только в степени $^1/_3$:

$$D \sim l^{-1/3}. \quad (10)$$

Таблица 1

Наиболее вероятные значения l_i и p_i

Возможности	Оцененный ряд значений для l_i (в годах)	Принятые значения		$p_i l_i$, годы
		l_i, годы	p_i,	
Полная гибель всего живого	0—200	100	0,05	5
Гибель сознательной жизни	0—50	30	0,60	18
Вырождение	10^4—10^5	$3\cdot 10^4$	0,15	4 500
Потеря интереса	10^3—10^5	10^4	0,20	2 000
Неограниченное развитие	$\geqslant T-T_0$	$T-T_0$	0,00	0

В табл. 1 приведены значения, которые, на мой взгляд, являются наиболее вероятными, и для краткости я опускаю все длинные рассуждения, которые приводят к этим значениям (например, $p_5 = 0$ означает, что я считаю этот случай невозможным). Может быть, это довольно субъективное предположение кажется несколько пессимистичным, но я хочу быть осторожным. Исходя из этих значений, получаем

$$l = 6500 \text{ лет} \quad \text{и} \quad Q = 4. \quad (11)$$

Если мы примем $T = 10^{10}$ лет, $\nu_0 = 0,06$ (немного меньше, чем оценка Су-Шу Хуана [2]) и $D_0 = 2,3$ *парсек* (как среднее расстояние между десятью ближайшими к Солнцу звездами), то получим

$$\nu = 2,6\cdot 10^{-7} \quad (12)$$

как долю звезд, имеющих в настоящее время технологические цивилизации, и

$$D_0 = 360 \text{ парсек} \quad (13)$$

для среднего расстояния до десяти ближайших технологических цивилизаций. К тому же из уравнения (8) мы получаем, что первая цивилизация, от которой мы зарегистрируем сигналы, будет иметь наиболее вероятный «технологический возраст»

$$t = 1,2\cdot 10^4 \text{ лет} \quad (14)$$

и, следовательно, должна уже давно выдержать первый кризис; вероятность же того, что она будет являться преемницей более старых, угасших цивилизаций на этой же планете, равна

$$p_r = 75\%. \quad (15)$$

С другой стороны, вероятность встретить цивилизацию, находящуюся точно на такой же стадии развития, что и мы (еще стоящую перед угрозой гибели, группы $i = 1$ и $i = 2$), равна только 0,4%. В итоге мы определяем средний возраст наиболее часто встречающихся цивилизаций как $L = 2t$ и получаем

$$L = 2,4\cdot 10^4 \text{ лет}. \quad (16)$$

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Как и упоминалось раньше, эту оценку нужно рассматривать только как рабочую гипотезу, которой можно было бы руководствоваться при будущих поисках внеземных сигналов. Если мы предположим, что значения, принятые в табл. 1, не слишком ошибочны, и если мы пренебрежем эффектом «обратной связи», рассмотренным в следующем разделе, то можем прийти к следующим заключениям.

1. Значение $\nu = 2,6\cdot 10^{-7}$ означает, что только одна из трех миллионов звезд имеет технологическую цивилизацию, а это подразумевает то, что нельзя искать сигналы от небольшого числа отдельных ярких звезд; необходимо обследовать все небо.

2. Эта величина также означает, что ни одна другая цивилизация не будет посылать направленные сигналы (для привлечения внимания и установления контакта)

в сторону Солнца как одной из видимых звезд. Такие сигналы могут быть посланы от сигнализирующих звезд во всех направлениях.

3. Значение $D = 360$ *парсек* означает, что приемная антенна, используемая для поисков, должна иметь возможность воспринимать излучение с расстояний, по меньшей мере, скажем, в 400 *парсек*; при этом также необходимо учитывать возможную природу сигналов и излучаемую мощность.

4. Разыскиваемые нами цивилизации, весьма вероятно, будут много старше нас и гораздо более развиты. Возможность учиться у них нужно рассматривать как наиболее важный побудительный мотив для поисков этих цивилизаций.

5. Так как 360 *парсек* равно примерно 1000 световых лет, то ожидаемое время ответа на вопрос будет в среднем около 2000 лет; это приводит к трем следствиям: а) сигналы связи уже должны содержать информацию (включающую языковый код); б) нет необходимости спешить «разговориться» и можно будет использовать относительно длительные импульсы; в) возможно, что будет и «говорящий» и «слушающий», но «взаимный обмен» идеями должен быть сильно ограничен из-за длинной шкалы времени.

ВОЗМОЖНЫЙ ЭФФЕКТ «ОБРАТНОЙ СВЯЗИ»

Только что упомянутый «взаимный обмен» идеями приводит к необходимости рассмотреть обратное действие длительности радиосвязи на само общество. Предположим, что оцененное значение возраста l [уравнение (11)] для невозмущаемой ничем цивилизации слишком велико, так что в действительности ожидаемое время для ответа t_w больше продолжительности существования технологического склада ума. Тогда никто не получит ответа на свой сигнал. Некоторые еще не потерявшие надежду цивилизации (сделав слишком оптимистичную оценку l) могли бы в течение некоторого времени посылать сигналы, и последние случайно могли бы быть приняты другими. Но если поиски сигналов в среднем кончаются неудачей, то обычно вскоре наступает потеря интереса. Это мы назовем случаем А. С другой стороны, предположим, что

оцененное нами значение l слишком мало и что возможен реальный обмен. Это приведет к поддержанию интереса в течение очень длительного периода и может даже привести к взаимной помощи цивилизаций друг другу в разрешении сложных проблем и различных природных катаклизмов. Это мы назовем случаем Б. Таким образом, на мой взгляд, имеется значительная вероятность того, что или не будет никакого обмена, или будет очень большой обмен и низкая вероятность любой промежуточной ситуации. Небольшой обмен является, так сказать, неравновесным состоянием. К сожалению, наша оценка невозмущенного возраста как раз случайно попала в этот неустойчивый интервал, так что трудно сказать, какая из этих двух возможностей осуществится.

Определяющей величиной в этой проблеме является отношение среднего возраста наиболее часто встречающихся цивилизаций L к среднему времени ожидания ответа t_w. Это отношение равно

$$K = \frac{L}{t_w}, \qquad (17)$$

где $L = 2t$, t дается уравнением (8) и $t_w = 2D/c$ (c — скорость света). Подставляя наши оценки этих величин в (13), (14) и (16), получаем

$$K = 10{,}2. \qquad (18)$$

Десять переговоров за время жизни цивилизации должны означать некий обмен, но небольшой. Остается открытым вопрос, достаточно ли это для того, чтобы посредством обратной связи осуществился случай Б? Чтобы показать более четко, каким образом величина K зависит от сделанных предположений, запишем

$$K = \frac{c}{2D_0\,[(\nu_0 Q)^{1/3}\,(\Sigma p_i l_i^2/T^{1/3} l^{2/3})]} \qquad (19)$$

и для простоты предположим, что из всех возможных групп табл. 1 лишь одна группа с индексом k имеет высокое значение произведения $p_i l_i$ по сравнению со всеми другими. Тогда мы имеем $L = l_k$ и

$$K = \frac{c}{2D_0\,(\nu_0 Q p_k)^{1/3}\,(L^{4/3} T^{1/3})}. \qquad (20)$$

Мы видим, что, к сожалению, наиболее неопределенная величина L входит в уравнение с высокой степенью,

тогда как остающиеся не такие трудные величины Q, ν_0 и p_k имеют степень только $^1/_3$. Поэтому мы вкладываем всю неопределенность в величину L, положив

$$K = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{4/3} \tag{21}$$

при критическом возрасте L_0, равном

$$L_0 = \left(\frac{8D_0T}{c^3\nu_0 Q p_k}\right)^{1/4}. \tag{22}$$

Если мы воспользуемся значениями $D_0 = 2{,}3$ *парсек*, $T = 10^{10}$ лет, $c = 3\cdot10^{10}$ *см/сек*, $\nu_0 = 0{,}06$, $Q = 4$ и $p_k = {}^1/_3$, из уравнения (22) окончательно получим

$$L_0 = 4500 \text{ лет}. \tag{23}$$

Так как критический возраст в (22) слабо зависит от определяющих его величин (степень $^1/_4$), то полученное значение (23) не должно быть слишком ошибочным. Тогда все зависит от того, как велик невозмущенный возраст по сравнению с 5000 лет. Если он больше, то начинает работать обратная связь и осуществляется случай Б, что значительно увеличит возраст L вплоть до некоторого предельного значения L_m.

Однако на данном этапе мы подошли к границе нашего метода проведения оценок, так как, не имея связи с другими цивилизациями, мы не знаем, с чего начать и насколько сильным будет эффект обратной связи. Это уже чисто субъективное мнение: считать ли, что L_m будет не больше чем, скажем, миллион лет, или что оно, возможно, будет гораздо меньше миллиона.

Для того чтобы проиллюстрировать изменение различных величин в зависимости от величины L, я проделал некоторые расчеты, результаты которых представлены в табл. 2. Пользуясь теми же значениями, которые мы использовали в (23), получим

$$\nu = \frac{\nu_0 Q p_k K}{T} = \frac{L}{1{,}25\cdot10^{11}\text{ лет}}, \quad D = \frac{D_0}{\nu^{1/3}} = \frac{2{,}3_{пс}}{\nu^{1/3}}, \tag{24}$$

$$K = \left(\frac{L}{L_0}\right)^{4/3} = \left(\frac{L}{4500\text{ лет}}\right)^{4/3}, \quad t_w = \frac{2D}{c} = \frac{15\text{ лет}}{\nu^{1/3}}.$$

Таблица 2

Изменение величин $1/\nu$, D, t_w и K с возрастом L

L, годы	$1/\nu$	D, *парсек*	t_w, годы	K
100	$1{,}3\cdot10^9$	2 480	16 200	0,006
300	$4{,}2\cdot10^8$	1 720	11 200	0,027
1 000	$1{,}3\cdot10^8$	1 150	7 500	0,13
3 000	$4{,}2\cdot10^7$	796	5 190	0,58
10 000	$1{,}3\cdot10^7$	534	3 480	2,9
30 000	$4{,}2\cdot10^6$	370	2 420	12,4
100 000	$1{,}2\cdot10^6$	248	1 620	61,7
300 000	$4{,}2\cdot10^5$	172	1 120	268
1 000 000	$1{,}2\cdot10^5$	115	750	1 330

Мне хотелось бы подчеркнуть, что возраст L является крайне неопределенной величиной, в то время как на все остальные величины в уравнении (24) можно положиться с удовлетворительной степенью точности. Таким образом, если мы выбираем какое-то L, то обязательно должны принять и результат табл. 2, соответствующий этому L.

В частности, мы должны принять очень долгое время ожидания ответа t_w (по крайней мере 1000 лет, а возможно, и больше), если L остается в разумных пределах, и это довольно разочаровывающий результат. Это означает, что обратная связь и случай Б могут осуществиться только в том случае, если более высокоразвитые цивилизации способны мыслить, планировать и действовать в масштабах тысяч лет. Это сильно отличается от нашего собственного положения, так как мы были бы довольны, если бы смогли решать проблемы хотя бы следующих пяти лет. Но не исключено также, что развитие общества и увеличивающийся здравый смысл могли бы привести к тому же. Кроме того, даже если среднее значение K слишком мало для осуществления случая Б, все же возможны большие флуктуации K во времени и пространстве; и если посредством обратной связи где-то однажды осуществится случай Б, то он будет поддерживаться во времени и расширяться в пространстве. Поразительно, до чего это похоже

на проблему возникновения жизни вообще (и можно почувствовать сильный соблазн провести здесь еще больше параллелей)!

В общем я думаю, что обратная связь будет играть важную роль в том или ином направлении. Основная идея заключается именно в отказе от связи в случае разочарования и в увеличении усилий, если она успешна. Но я не могу сказать, в каком из этих двух случаев эффект обратной связи будет более чувствителен. Мы ожидаем в будущем или высокую активность при сообщении на коротких расстояниях (200—300 *парсек*) между долгоживущими цивилизациями (случай Б), или очень низкую в условиях больших расстояний (600—1000 *парсек*) между активными цивилизациями, подобными нашей собственной (случай А). Мы должны быть готовыми к обеим возможностям.

РАЗВИТИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ВЫВОДОВ

Если осуществляется обратная связь, что, по нашему мнению, будет, то некоторые из наших первых выводов должны быть изменены. Так как мы не можем сказать что-либо о характере обратной связи, нужно рассмотреть обе возможности.

1. Наши первые выводы под № 1, 2, 4, 5а и 5б никаким существенным изменениям не подвергаются, а именно мы не можем исследовать отдельные звезды, и никто не пошлет сигналы специально нам; цивилизация, которую мы встретим, будет гораздо более развита по сравнению с нашей, и сигналы контакта будут уже содержать информацию, для которой могут быть использованы относительно длительные импульсы.

2. Наша приемная система должна иметь возможность воспринимать излучение с расстояний либо 200—300 *парсек* в случае Б, либо 600—1000 *парсек* в случае А.

3. В случае А возможна или незначительна межзвездная связь, или же не будет никакой. В случае Б нужно ожидать высокоразвитую систему связи и большую активность.

4. По закону естественного отбора вид либо обладает желанием и способностью поддерживать свое существование, либо быстро гибнет. Следовательно, если обратная связь осуществила случай Б и еще поддерживает его существование, то это означает, что существуют некоторые эффективные способы для «новичков» установить связь (сигналы контакта) с другими цивилизациями.

ПРИРОДА СИГНАЛОВ

Чтобы иметь определенные шансы на успех, мы должны руководствоваться в своих поисках четким представлением о том, что́ мы разыскиваем. Это представление может оказаться неверным, и тогда нам необходимо будет начать с лучшего представления. Но ясно, что безнадежно непрерывно исследовать все небо по всем частотам и с очень узкой полосой ради просто «чего-нибудь».

Я предлагаю допустить, что природа сигналов будет полностью определяться двумя факторами: а) целью, которой они служат, и б) наиболее экономичным путем для достижения ее. Оба они способны решить задачу. Тот довод, что другие цивилизации могут коренным образом отличаться от нас, даже если он верен, совершенно не помогает проводить поиск, в то время как предшествующее допущение приведет к определенной программе, даже если оно необоснованно; только пробуя, мы определим, что верно и что неверно. Резюмировать сказанное можно так: поиски имеют удовлетворительную вероятность успеха, если они руководствуются наилучшим предположением, которое мы можем сделать, но поиски безуспешны, если они проводятся без определенного плана. Последующие рассуждения очень неполны и условны; предлагая их, я пытаюсь стимулировать лучшую формулировку, которую можно было бы практически использовать.

Что касается цели, то мы можем думать о трех основных возможностях: местное сообщение с другой планетой, межзвездная связь с несколькими определенными партнерами и желание привлечь внимание неизвестных будущих партнеров. Таким образом, то, что мы должны искать, можно было бы назвать местным радиовещанием, переговорами на длинных дистанциях и сигналами контакта. Местное радиовещание имеет наивысшую вероятность существования, но может быть крайне трудным для обнаружения из-за своей относительной слабости. Перего-

воры на длинных дистанциях не должны быть направлены на нас, и лишь случайно мы могли бы на них натолкнуться; однако *вероятность такого события мала*. Сигналы же контакта должны предназначаться именно для такого рода поисков, которые мы собираемся начать, и, следовательно, должны иметь наивысшую вероятность обнаружения при условии, что они действительно существуют. Местное радиовещание должно существовать в обоих ранее определенных случаях А и Б, в то время как переговоры на длинных расстояниях и сигналы контакта должны существовать только в случае Б.

Что касается используемых частот, то для местного радиовещания они могли бы не очень отличаться от наших собственных, но для сигналов на межзвездные расстояния диапазон частот должен быть ограничен соображениями экономии. Дрейк [3] подсчитал совместное влияние галактического и атмосферного шумов и обнаружил широкий минимум между 1000 и 10 000 *Мгц*. В последней статье Дрейк [4] нашел даже общее правило для определения наиболее экономичной частоты в случае посылки и приема сигналов с планетных атмосфер. Она должна лежать в диапазоне от 1000 до 30 000 *Мгц*; наиболее вероятная частота, которую еще можно обнаружить внутри нашей атмосферы, равна примерно 10 000 *Мгц* ($\lambda = 3$ *см*).

Дрейк отметил [4], что местное радиовещание должно занимать огромное количество узких каналов, распределенных по большому диапазону частот. Он разработал очень эффективный метод обнаружения сигналов, основанный на пересечении двух независимых частотных соотношений. Этот метод не касается отдельных сигналов, их частот или интенсивностей, но позволяет очень точно определить, имеются или нет сигналы на одних и тех же частотах в обеих зависимостях. Это *первая вещь, которую нужно узнать*.

Что касается переговоров на далеких расстояниях, то мы оценили вероятность натолкнуться на них с Земли. Так как ответ не очень ободряющ, я пропущу детали и сразу дам результат. Если каждая цивилизация постоянно разговаривает (а также слушает) с n числом своих соседей, если сигналы имеют направленность β и если мы можем обнаружить эти сигналы с расстояния в q раз

большего, чем то, с которого они посланы ($q > 1$, так как обнаружить легче, чем понять), то наша вероятность случайно натолкнуться на эти сигналы равна примерно

$$P = \left(\frac{\pi}{120}\right) q^3 \beta^2 n^2 \ldots \tag{25}$$

— величине, которая не зависит от L и D.

Если мы возьмем $P = 1/2$, т. е. достаточно большим для оправдания поисков, $q = 5$ и $\beta = 1'$ в качестве вероятных значений, то это обязательно повлечет за собой, что каждая цивилизация непрерывно разговаривает с $n = 1300$ другими цивилизациями, что весьма неправдоподобно. Но если мы в качестве разумной величины возьмем $n = 50$, то тогда нам потребуются более крайние значения для q и β, а именно $q = 10$ и $\beta = 10'$, что снова невероятно. Так как все неизвестные величины входят в (25) с высокой степенью, мы считаем, что вероятность подобного столкновения в высшей степени мала (хотя и не невозможна). Другая трудность заключается в том, что ширина полосы, возможно, должна быть крайне узка, а мы не знаем способов для точного определения используемой частоты.

Сигналы контакта представляют собой увлекательнейшую проблему. Если они действительно существуют, их задача — привлечь внимание любой новой цивилизации. Если бы мы могли догадаться о наиболее экономном способе их посылки, то мы бы тогда точно знали, что́ искать; это значительно увеличило бы вероятность обнаружения сигналов и, следовательно, сделало бы этот метод наиболее экономичным. Тогда возникает задача: как точно определить слово *экономичный*? Я должен признаться, что не смог найти достойного определения и должен в настоящее время оставить эту проблему открытой.

Предположим, что мы бы нашли правильное определение. Это дало бы нам возможность подсчитать для каждого метода предполагаемую стоимость C (или то, что мы называем мерой усилий с нашей стороны, с другой стороны или с обеих сторон), которую пришлось бы уплатить для получения возможности обнаружения P_d на расстоянии D_d за время t_d. Для P_d мы могли бы взять значение $1/2$, для D_d — среднее расстояние D (от 200 до 300 *парсек*)

и для t_d — половину того числа лет, по истечении которых наиболее молодые цивилизации должны отказаться от дальнейших поисков в случае их безрезультатности (возможно, несколько сот лет). Мы подсчитываем значение C для всех предложенных методов и заключаем, что один из них с наименьшим значением C будет именно тем методом, которым пользуются другие цивилизации при одном условии. Наши рассуждения о методе, так же как наше определение *экономичности*, зависит от нашего современного уровня развития. Другие цивилизации должны стоять на более высокой ступени развития по сравнению с нами, но у них должен быть опыт общения с новичками, в силу чего они должны установить определенный стандарт того, что обязан знать новичок, и как много он должен суметь угадать, чтобы стать новым партнером. Тогда этим условием является то, что мы уже удовлетворяем этому стандарту. Так это или нет, мы выясним только в том случае, если начнем поиски.

Значение C будет наименьшим тогда, когда вся мощность посылается в одном узком канале в определенной частоте, которую может предположить слушатель. Как указали Кокконн и Моррисон [5], единственной вехой, которую мы знаем в интересующем нас диапазоне частот и можем использовать для этой цели, является линия 21 *см*. Я предлагаю несколько изменить эту частоту. В пределах этой линии фон сигнала был бы много сильнее, чем вне ее; возможно, достаточно сильным для того, чтобы заглушить слабый сигнал, поэтому крылья линии не представляют собой подходящее место для такого сигнала. Тогда можно было бы воспользоваться таким предположением, как взять точно *удвоенную* частоту линии 21 *см*. Если бы это предположение потерпело неудачу, нам пришлось бы изыскивать более утонченные методы посылки сигналов контакта.

Каждый метод должен включать *основной* план распределения передаваемой мощности по пространству, времени и частотам и ряд *параметров*, управляющих этими распределениями. От нас требуется предложить такой план и выбрать такие параметры, которые доводят до минимума величину C. Что же касается параметров, которые не влияют на величину C, то нам придется сначала испытать их, прежде чем мы натолкнемся на их правильные значения. Таким образом, вероятность обнаружения нужно рассчитывать в предположении, что и план и минимальные параметры нам известны и что мы систематически изменяем остающиеся некритические параметры в пределах возможного ряда их значений. Таковы, следовательно, правила в этой увлекательной игре.

Мне хотелось бы упомянуть еще два правила, которые, возможно, играют роль. Первое: из-за долгого времени ожидания сигналы контакта, по-видимому, должны содержать информацию. Здесь имеются две возможности: или весь сигнал контакта будет носить характер кодируемого сообщения, или характер сигнала должен быть разработан таким образом, чтобы он направлял наше внимание на точную частоту, на которой посылается информация. В силу того что обнаружение сигнала имеет бóльшую важность, чем послание, и обнаружение легче, а также потому, что этот «разговор» не требует поспешности, я считаю, что второй случай более вероятен и что для сообщения достаточно иметь немного каналов. Второе: сигнал контакта не должен интерферировать с другим активным процессом, таким, как уже существующая связь; это означает, например, что он не должен занимать слишком большой участок всего спектра частот. (Сигналы контакта и сигналы на длинные расстояния должны иметь примерно один и тот же диапазон наиболее экономичных частот.) Для того чтобы дать представление о способе, с помощью которого сигнал контакта мог бы привлечь внимание к информации, я приведу один пример. Мы распределяем большое количество сигналов по диапазону экономичных частот таким образом, чтобы они были расположены симметрично относительно центра этого диапазона. По направлению к центру мы уменьшаем расстояние между сигналами (и их ширину полосы) пропорционально расстоянию от центра до тех пор, пока мы не придем к крайне узкому каналу в самом центре диапазона (все другие детали устройства полностью определяются минимальным значением C). В этом центральном канале языковый код повторяется, скажем, каждые 10 лет, и к концу этого времени слушателю рассказывается, на какой

частоте найти следующее сообщение и так далее; вся эта информация посылается одновременно, но читается в строгом порядке. В конце концов слушателю сообщается, на какой частоте и с какой мощностью он должен отвечать.

ОКОНЧАТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Наши поиски должны руководствоваться предположением, что природа сигналов будет полностью определена целью, которой они служат, и наиболее экономичным путем достижения этой цели. Для того чтобы увеличить вероятность обнаружения, мы должны попытаться определить оба эти фактора.

2. Мы рассмотрели три вида сигналов, предназначенных для различных целей, которые мы назвали местным радиовещанием, переговорами на далекие расстояния и сигналами контакта. Местное радиовещание имеет наибольшую вероятность существования, но обнаружить его должно быть крайне трудно. Переговоры на далекие расстояния существуют только в случае Б, и вероятность случайного столкновения с ними для нас очень мала. Сигналы контакта должны также существовать только в случае Б, и они имеют наибольшую вероятность обнаружения, потому что они разработаны именно для этой цели. Поэтому, а также в силу вывода № 4 из предыдущих заключений я рекомендую начать поиски в предположении случая Б и искать сигналы контакта. Если это окажется безуспешным, мы могли бы тогда направить наши усилия на поиски местного радиовещания в предположении случая А.

3. В настоящее время нельзя предложить никакой определенной программы для поисков сигналов контакта. Но можно выдвинуть основное разумное требование, необходимое, чтобы подойти к такой программе: предположить и оценить (насколько это возможно для нас) природу сигналов и предположить, какими знаниями мы должны обладать по расчетам тех, кто посылает информацию; такой подход приведет нас к наиболее экономичному способу посылки сигналов контакта.

4. Поиски других цивилизаций будут иметь или огромный результат, или никакого. Поэтому, надеясь на первый случай, я советую начать поиски как можно скорее и пытаться сделать как можно больше. Но чтобы быть подготовленными ко второму случаю, я советую разработать такую приемную систему, которая могла бы быть использована также и в обычной астрономии, так как по своим размерам и чувствительности, необходимыми для первой задачи, она будет чрезвычайно эффективной. Время наблюдения тогда должно быть разделено на равные части между двумя задачами, предписанными инструменту.

Должны ли мы действительно искать сигналы от других разумных существ? Я думаю — да. Однако нужно попытаться отчетливо представить себе, что́ означал бы успех этих поисков для нас в свете громадной мощности умственного контакта, на котором основано существование человечества.

Это означает, что внутреннее убеждение стало достаточно сильным, чтобы создать уверенность, необходимую для таких поисков: уверенность в универсальности жажды познания, желании взаимопонимания и использовании логики, уверенность в самом партнере и, наконец, уверенность в универсальности этой самой уверенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bracewell R. H., Nature, 186, 670 (1960).
2. Huang S.-S., Publ. Astron. Soc. Pacific, 71, 421 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 222—228.)
3. Drake F. D., Sky and Telescope, 19, 140 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 183—192.)
4. Drake F. D., in preparation.
5. Cocconi G., Morrison P., Nature, 184, 844 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 177—182.)

27 МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ

С тех пор как стало известно о существовании других миров, возможно, пригодных для обитания, появились предположения о неземных формах жизни. Древние греки считали возможной жизнь на Луне. Так думали астроном Кеплер и фантаст Жюль Верн. В нашем веке лишенная атмосферы Луна уже не рассматривается всерьез как возможная обитель живых существ, и внимание было перенесено на другие планеты солнечной системы — в особенности на Марс и Венеру. С увеличением наших знаний о физических условиях на поверхности этих планет существование разумной жизни на них стало гораздо менее вероятным. На сегодняшний день никто всерьез не ожидает найти разумную жизнь еще где-нибудь в пределах солнечной системы, хотя наличие примитивной растительности на Марсе вероятно, и некоторые склонны предполагать наличие аммиачных форм жизни на Юпитере.

Достаточно странно, что в то время как дальнейшее изучение нашей солнечной системы убеждает нас в отсутствии в ней разумной жизни вне Земли, исследования в других областях значительно увеличивают наши оценки распространенности разумной жизни в других частях Вселенной, на планетных системах других звезд. Звезд, разумеется, чрезвычайно много — около ста миллиардов в нашей Галактике и известны сотни миллиардов других галактик. Предположение, что в этом необозримом космосе

существует жизнь где-то кроме Земли, напрашивается само собой и является правдоподобным, но не научным. Фактически вопрос стоит так: «сколько звезд имеют планетные системы, богатые необходимыми для жизни тяжелыми элементами, и если есть подходящая планета, какова вероятность возникновения и развития жизни на ней?»

ПЛАНЕТЫ МНОГОЧИСЛЕННЫ

Всего несколько десятилетий назад считали, что планетные системы образуются крайне редко в результате тесного сближения двух звезд. С этой точки зрения только одна звезда из миллиарда должна иметь планеты. Теперь считают, что возникновение планетной системы — необходимый этап эволюции типичной звезды [1—3]. Жизнь звезды начинается с огромного облака межзвездного газа, по диаметру во много раз превосходящего солнечную систему. Как правило, это обширное газовое облако будет медленно вращаться. Когда оно сконденсируется под действием сил притяжения, скорость его вращения резко увеличится, так как момент количества вращения останется неизменным. Через некоторое время оно стянется примерно до размеров солнечной системы, т. е. до размеров орбиты Плутона или Нептуна, и сплющится под действием центробежной силы в быстро вращающийся диск горячего ионизированного газа. Для того чтобы сконцентрироваться в сферическую звезду, вращающийся газовый диск должен потерять бóльшую часть своего начального момента количества движения. Это может произойти только при отделении газовых масс-спутников с периферии диска и передачи им момента количества движения путем магнитогидродинамического взаимодействия. Здесь имеется в виду ускорение ионизированного и вследствие этого проводящего спутника магнитным полем ионизированной центральной вращающейся массы. Когда каждый спутник приобретет таким образом большую орбитальную скорость, центральная масса будет сжиматься дальше, и этот процесс будет повторяться до тех пор, пока центральная масса не станет звездой. Затем массы-спутники конденсируются и остывают, и из них образуются планеты и спутники планет. В нашей солнечной системе на долю Солнца

приходится свыше 99% всей массы, хотя более 98% момента количества движения приходится на планеты.

Так как Галактика в целом вращается, типичная газовая масса должна претерпеть подобный процесс звездообразования, и планетные системы являются скорее правилом, чем исключением. Некоторые близкие звезды обнаруживают волнообразность в своем видимом движении, что может быть объяснено обращением вокруг них планет с массой порядка массы Юпитера.

Более старые звезды, относящиеся к так называемому II типу галактического населения, почти целиком состоят из водорода. Маловероятно, что они имеют твердые планеты, или, если даже это так, что на них может возникнуть жизнь. Но в этих звездах в течение их жизни водород преобразуется в тяжелые элементы, и когда они, «умирая», вспыхивают как сверхновые, тяжелые элементы выбрасываются в пространство. Здесь эти элементы смешиваются с большим количеством водорода и образуют газовые массы, из которых возникает второе поколение звезд типа Солнца (I тип населения) [4]. На планетах звезд этого типа возможно возникновение жизни.

ЖИЗНЬ ВЕРОЯТНА, НО ДАЛЕКА ОТ НАС

Несколько десятилетий назад происхождение жизни было тайной. Думали, что жизнь — явление в высшей степени редкое, если только в прошлом не было особо благоприятных условий. Теперь считают, что подходящие условия существуют по крайней мере на одной из планет типичной звезды, относящейся к I типу населения [5, 6]. Полагают, что первоначальные атмосферы планет типа Земли состояли из аммиака, метана, водяного пара и других молекулярных газов. Под действием ультрафиолетового излучения из такой газовой смеси образуются аминокислоты, составные части белка. На первозданной Земле или другой подобной планете эти аминокислоты попадали в только что образовавшийся океан, образуя в буквальном смысле бульон, покрывающий планету. При наличии некоторого количества радикалов фосфорной кислоты нетрудно представить себе образование большого числа молекул, из которых полимеризуется дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК). Опыты показали, что как только образуется первый полимер ДНК, начинается процесс самовоспроизведения. Это воспроизведение на самом основном — молекулярном уровне. В один прекрасный момент наш стерильный бульон превращается в море генов и даже хромосом. Те, кто изучал вопрос о возникновении жизни, убеждены теперь, что жизнь обязательно возникнет на планете, хотя бы только приблизительно похожей на раннюю Землю. Возможно, что в 1—10% она разовьется в сложные и, может быть, разумные формы.

Таким образом, в течение нашего столетия, в то время как наши надежды найти внеземную разумную жизнь в солнечной системе фактически свелись к нулю, в отношении других звездных систем они возросли в огромной степени. Мы теперь рассматриваем Вселенную как изобилующую жизнью, но эта жизнь настолько удалена от нас, что это исключает возможность установления когда-нибудь физического контакта. Ближайшая звезда, α Центавра, удалена от нас на 4 световых года. Для сравнения: диаметр нашей солнечной системы всего 0,001 светового года. Хотя человек в ближайшие десятилетия сможет осмотреть вблизи всю солнечную систему с помощью приборов (или даже своими глазами), исследовать пространство на протяжении тысяч световых лет в поисках жизни представляется пока невозможным. Единственная форма контакта, которая кажется осуществимой в настоящее время,— некоторые виды электромагнитной связи.

ВЫЗЫВАЯ ВСЕ ЗВЕЗДЫ

В проблеме межзвездной связи можно выделить три основных аспекта. Во-первых, техническая проблема: можно ли передать сигнал на такие большие расстояния, и если можно, то как это лучше сделать? Во-вторых, проблема поиска: как мы можем привлечь внимание других мыслящих существ или они — наше? И, наконец, собственно проблема связи: как обмениваться осмысленной информацией с совершенно чуждой цивилизацией?

Очевидно, техническая проблема определяется расстоянием, зависящим от плотности цивилизаций, с которыми может быть установлена связь, среди близлежащих звезд.

Реальная попытка определить эту плотность была сделана в ноябре этого года на национальной радиоастрономической конференции в Грин Бэнк, Западная Виргиния. На основании количественных оценок ряда независимых факторов составилось мнение, что, если мы сможем передавать сигналы на расстояния до 10 световых лет, наши шансы установить контакт крайне незначительны — примерно один на миллион. Но если мы сможем передавать сигналы на расстояния до 1000 световых лет (и делать это очень долго), наши шансы неплохи — примерно 50%. Звезды с планетами, которые могут быть обитаемы, существуют примерно в 10 световых годах от нас. В сфере радиусом 1000 световых лет имеются десятки тысяч кандидатов.

Максимальный радиус действия системы межзвездной связи определяется тремя факторами: излучаемой энергией на единицу информации, коэффициентом направленного действия антенны и шумами. При простейшей (и весьма близкой к оптимальной) системе модуляции единицей информации будет импульс или пауза, и таким путем сообщение будет закодировано. Тогда предел усиления, которое может быть использовано в приемнике, определяется шумами на его входе, т. е. энергией флуктуаций, распределенной по всем частотам. Чтобы обнаружить импульс, т. е. различить его наличие или отсутствие, энергия сигнала должна быть сравнимой или превосходить энергию шума, принятую за время, равное длительности импульса. Таким образом, отношение сигнал/шум (их энергий) есть мера обнаружимости. Если это отношение равно 1, обнаружение будет на пределе, и возможны многочисленные ошибки. Если это отношение равно 100, обнаружение будет почти достоверным. Если мы удвоим длительность импульса при той же импульсной мощности, мы тем самым удвоим энергию импульса. Мы сможем принимать эти удлиненные импульсы приемником с удвоенной постоянной времени и тем самым — с вдвое меньшей полосой пропускания. Этот узкополосный приемник будет принимать вдвое меньшую мощность шумов, и поэтому шумовая энергия за время импульса останется прежней. Таким образом мы удвоили отношение сигнал/шум путем удвоения энергии импульса и применения соответствующего приемника. Разумеется, мы теперь сможем передавать сигналы только с половинной скоростью. Для межзвездной связи будут, вероятно, использоваться максимально достижимые мощности и очень длинные импульсы, так как скорость передачи сообщения имеет малое значение, по крайней мере на первых порах.

Размер передающей антенны, выраженный в длинах волн, определяет ее способность концентрировать энергию в луч, направленный на приемник. Физический размер приемной антенны определяет, сколько передаваемой энергии улавливается. Фактически отношение принятой энергии к излученной равно $\frac{A_T A_R}{\lambda^2 D^2}$, где A_T и A_R — эффективные площади передающей и приемной антенн, λ — длина волны, D — расстояние между антеннами. Таким образом, размеры обеих антенн должны быть максимальными из возможных.

Рассмотрим теперь спектральное распределение мощности шумов. Все тела, которые могут поглощать и тем самым переизлучать электромагнитные волны, являются источниками теплового шума, или излучения черного тела. Тепловые шумы генерируются сопротивлениями, нагретыми поверхностями или газами, на которые может быть направлена антенна. Так как мощность теплового шума на низких частотах имеет спектральную плотность kT *вт/гц* (где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град* — постоянная Больцмана), удобно и общепринято рассматривать источник шума со спектральной плотностью ψ как эквивалентный чисто тепловой источник с температурой $T = \psi/k$. На рис. 1 приведены эффективные температуры шумов трех источников, важных для рассматриваемой проблемы.

Космический шум принимается из любой части неба, но наиболее интенсивен в направлении на центр Галактики [7]. Это тот шум, который впервые обнаружил Янский [8]; его открытие положило начало радиоастрономии. С увеличением частоты интенсивность космического шума быстро падает, как показывает график на рис. 1 в [9].

Даже идеальный усилитель, не генерирующий тепловых шумов, не является нешумящим. Доказано, что квантовые эффекты являются причиной шума с мощностью (отнесенной ко входу усилителя) $h\nu$ *вт/гц* (где $h =$

$= 6{,}22\cdot 10^{-34}$ *дж·сек* — постоянная Планка, ν — частота), дающей эффективную температуру $h\nu/k$ [10]. Этот источник шума нельзя устранить применением фотонных детекторов вместо когерентных усилителей, так как этот шум является следствием флуктуаций числа фотонов.

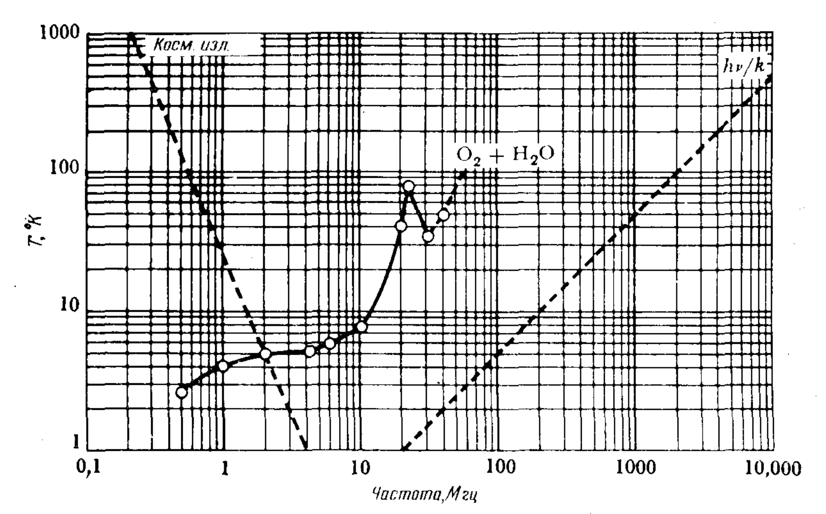


Рис. 1. Эквивалентные шумовые температуры различных источников.

Суммарный шум этих двух источников имеет минимум на частоте около 8 *Ггц* (1 *Ггц* = 1 гигагерц = 10^9 *гц*), равный примерно 0,5° *K*. Столь низкая температура придает особое значение исключению источников теплового шума в приемнике. Частота 8 *Ггц* была бы удобна для межзвездной связи, если бы наш приемник помещался в космосе. Приемник, расположенный на Земле, будет принимать атмосферные шумы, вызываемые поглощением и переизлучением электромагнитной энергии молекулами кислорода и водяного пара [11]. С учетом этого обстоятельства самая «бесшумная» частота лежит в области 2—10 *Ггц*, где эффективная температура шумов 5—10° *K*. Для частот свыше 50 *Ггц* атмосфера непрозрачна из-за полос поглощения кислорода, водяного пара и углекислого газа. Хотя в инфракрасной области прозрачность атмосферы

увеличивается, $h\nu/k$ достигает величины в несколько тысяч градусов. Таким образом, имеются две возможные области для связи: одна в инфракрасной и видимой части спектра и другая, с гораздо меньшими шумами, в диапазоне СВЧ.

Появление оптических мазеров, или лазеров, повысило интерес к возможности использования оптических частот для межзвездной связи [12]. С помощью оптических «антенн» скромных размеров могут быть получены очень узкие пучки. Однако пучок, значительно меньший 1″, невозможно использовать из-за атмосферной турбулентности и проблемы «прицеливания». Пучки же порядка 1″ не дают достаточного преимущества перед существующими большими антенами СВЧ, чтобы скомпенсировать увеличение шума на оптических частотах (примерно до 20 000° *K*). Таким образом, при современном положении дела диапазон СВЧ представляется наилучшим. На рис. 2 приведены сравнительные характеристики двух оптических и одной СВЧ-систем.

По оси ординат отложено число фотонов *n*, принимаемых за один импульс оптическими системами, и энергия принятого импульса, деленная на *kT*, для СВЧ-системы. Каждая из этих величин дает величину отношения сигнал/шум (с/ш) системы, так что ординаты сравнимы. Современный лазер с энергией в импульсе 10 *дж* при длине волны 0,7 *мк* с 10-дюймовыми (254 *мм*) телескопами в качестве приемной и передающей антенны имеет характеристику, изображенную левой прямой. Порог чувствительности приемника предполагается равным идеальному квантовому порогу. Мы видим, что отношение с/ш падает до 1 на расстоянии 0,04 светового года. Увеличив энергию излучаемого импульса до 10^4 *дж*, получим характеристику, изображенную пунктиром: с/ш = 1 на расстоянии немного более 1 светового года. Линия справа относится к СВЧ-системе с энергией импульса 10^4 *дж* на волне 21 *см*, с 600-футовыми (183 *м*) приемной и передающей антеннами, с температурой шумов приемника 10° К. Мы видим, что с/ш достигает 1 на расстоянии 100 световых лет; на расстоянии 10 световых лет с/ш = 100. На самом деле в настоящее время вполне осуществима энергия импульса 10^6 *дж* (мощность 1 мегаватт в течение 1 *сек*),

что дает с/ш = 100 на расстоянии 100 световых лет и с/ш = 1 на расстоянии 1000 световых лет. Тот же результат может быть получен с 230-футовыми (70 *м*) антеннами на частоте 10 *Ггц*. Можно сделать вывод, что техническое решение проблемы вполне в наших силах при условии, что наши предполагаемые абоненты будут действовать соответствующим образом.

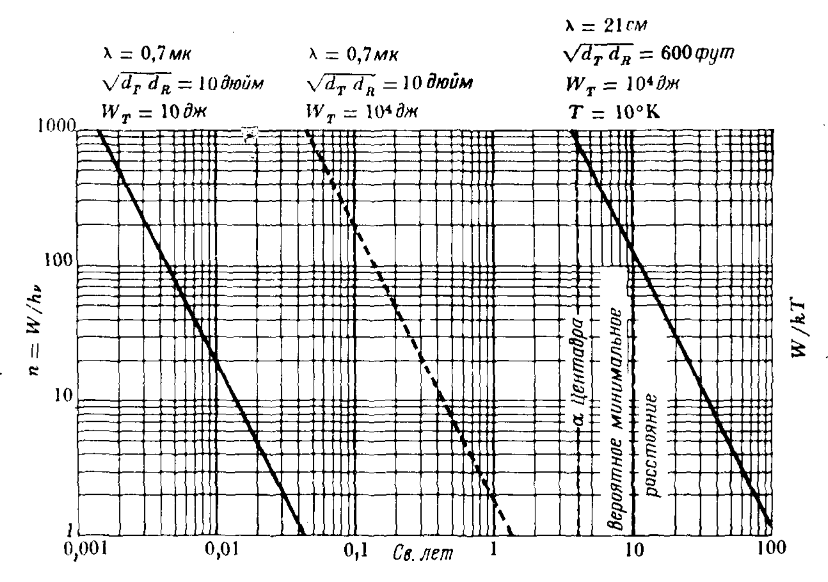


Рис. 2. Сравнение возможностей связи при помощи лазеров и СВЧ-техники.

Что можно сказать о проблеме поиска? Как нам привлечь внимание других мыслящих существ или искать их сигналы? Передаем ли мы, или «слушаем», или то и другое вместе, но мы должны искать не только в пространстве, от звезды к звезде, но также и во времени, в течение длительного периода, и, кроме того, по возможности на разных частотах. Если мы сможем исключить поиск по одному из этих параметров, мы в огромной степени упростим задачу. Если бы мы (или другие мыслящие существа) имели возможность излучать очень короткие импульсы очень большой мощности, скажем 10^{16} *вт* в течение 10^{-10} *сек*,

мы (или они) могли бы заполнить энергией бо́льшую часть диапазона СВЧ, так как короткие импульсы имеют очень широкий спектр. Тогда можно было бы использовать приемник с очень широкой полосой, примерно от 2 до 10 *Ггц*, и отпала бы необходимость поиска по частоте. Но это исключается тем, что большие значения энергии в импульсе могут быть получены только с использованием максимально доступных мощностей в длинных импульсах, что требует применения узкополосного приемника.

Поиск по частоте может также быть исключен или сильно сокращен при излучении в «натуральных» или близких к ним частотах, таких, как частоты спектральных линий. Это характерное преимущество лазеров и один из веских аргументов в их пользу. В основу проекта «Озма» положено остроумное соображение Кокконп и Моррисона, что нужно прослушивать сигналы на частоте водородной линии 1420 *Мгц* (21 *см*). Они утверждают, что, поскольку бо́льшую часть наблюдений производят на этой частоте, в любой другой части Вселенной радиоастрономы должны поступать точно так же и мыслящие существа, пытающиеся установить связь, должны выбрать эту частоту или близкую к ней.

Хороший поисковый сигнал должен заметно выделяться среди всех естественных сигналов. Это необязательно должен быть ряд простых чисел, как часто предлагают, это могут быть и просто импульсы. Но он не должен быть закодирован настолько эффективно (по Шеннону), чтобы походить на тепловой шум. (Шеннон показал, что если информация кодируется сигналами, статистические характеристики которых близки к характеристикам теплового шума, то этим достигается наибольшая скорость передачи информации при данной мощности и полосе пропускания.) Поисковый сигнал может содержать указания для обнаружения и приема других сигналов, закодированных более эффективно, но сам поисковый сигнал должен привлекать внимание. Проблема поиска нуждается в дальнейшем изучении и должна пересматриваться в свете всех новых технических достижений.

Как мы попытаемся выразить какую-то мысль? Так как ближайшая звезда с предполагаемой разумной жизнью удалена от нас на 10 световых лет, ответ может быть

получен не раньше чем через 20 лет. Конечно, мы не станем зря тратить время, посылая простые импульсы, пока не получим ответ. Другие мыслящие существа, вероятно, сочли бы нас такими болванами, что не позаботились бы ответить. Я думаю мы должны посылать повторяющиеся серии сообщений, которые составят курс сведений о нашей цивилизации, нашем языке, нашей науке и о нас самих. Другие мыслящие существа смогут тогда ответить гораздо более содержательным начальным сообщением, может быть, используя более эффективные средства связи.

Я думаю, что при составлении этих первых поисковых сообщений нам необходимо подтвердить одно очень важное предположение о других разумных существах: что у них есть глаза или что-нибудь подобное. Зрение — настолько важный орган чувств, что трудно представить себе технический прогресс мыслящих существ, лишенных его. Оно развито среди самых разных земных форм жизни. Глаза есть и у птиц, и у мышей, и у человека. Так как рисунок является хорошим, если не лучшим, средством выражения мысли при отсутствии общего языка, начальные сообщения должны быть, вероятно, графическими. Другие мыслящие существа, наверное, выберут графическое сообщение по тем же соображениям.

Добавим, что определенные математические и физические зависимости будут ясно и точно истолкованы любыми мыслящими существами, техника которых достаточно развита, чтобы вообще принять сообщение. Простые числа, например, остаются простыми в любой системе счисления. Строение атома не зависит от того, кто его изучает.

Опираясь на эти принципы, Ф. Дрейк составил имитацию сообщения, которую послал по почте участникам ранее упомянутой конференции [14]. Ключ для расшифровки дан не был, но, несмотря на это, большинство очень быстро и правильно уловило основной смысл сообщения. Здесь приведено это простое сообщение, которое вы можете испытать на ваших друзьях.

КОНТАКТ!

Предположим, что после тщетного многолетнего прослушивания мы приняли необычную серию импульсов и пауз с ε Эридана. Сообщения повторяются каждые

22 часа 53 минуты (очевидно, такова продолжительность их суток). Импульсы разделены промежутками, кратными наименьшему. Если писать вместо импульсов единицы и заполнять промежутки соответствующим количеством нулей, получим бинарную серию, показанную на рис. 3. Она содержит 1271 нуль и единицу. 1271 есть произведение двух простых чисел — 31 и 41. Это явно предполагает, что знаки нужно расположить в 31 или 41 строку или столбец. Если проделать это, оставляя промежутки вместо нулей и ставя точки вместо единиц, получим упорядоченный рисунок, приведенный на рис. 4. По-видимому, мы имеем дело с прямоходящими двуногими существами, размножающимися половым путем. Можно даже предположить, что они млекопитающие. Грубый круг и столбик точек слева обозначают их солнце и планетную систему. Фигура указывает на четвертую планету, очевидно их родину. Слева планеты перенумерованы от центра системы в двоичном коде, вес разряда которого увеличивается слева направо. Код содержит десятичную (или скорее двоичную) точку, обозначающую начало. Волнистая линия, начинающаяся от третьей планеты, показывает, что она покрыта водой, и рыбообразная фигура говорит о том, что там есть морские животные. Двуногие знают это, следовательно, они могут совершать космические путешествия. Диаграмму наверху можно рассматривать как изображение атомов водорода, углерода и кислорода, значит основа их жизни — углеводороды. Двоичное число шесть возле поднятой руки правой фигуры обозначает шесть пальцев и подразумевает двенадцатиричную систему счисления. Наконец, масштабная линия в правом нижнем углу наводит на мысль, что рост фигуры — одиннадцать каких-то единиц. Так как длина волны 21 *см*, на которой мы приняли сообщение — единственный размер, известный и им и нам, мы заключаем, что их рост — 231 *см* (7 футов).

Количество информации в этом сообщении, конечно, меньше шенноновского предела. Легко можно составить лучшее с этой точки зрения сообщение. Реально в составленном Дрейком сообщении использован всего 551 двоичный знак для передачи примерно такого же количества информации. Тем не менее представляется неожиданным,

Рис. 3. Воображаемое послание из космического пространства.

что из 250 импульсов можно узнать так много о других мыслящих существах.

Вероятность существования других цивилизаций и вместе с тем фактическая невозможность физического контакта с ними делают изучение электромагнитной межзвездной связи привлекательным и, возможно, плодотворным. Передавать сигналы на требуемые расстояния представляется

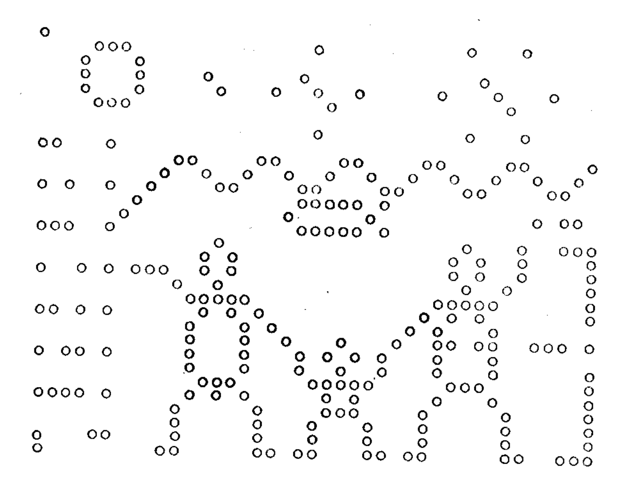


Рис. 4. То же самое послание, но «расшифрованное».

технически осуществимым. Нетрудно, кажется, передавать и осмысленные сообщения. Если мы решим проблему поиска (и экономическую проблему получения необходимой мощности в течение длительного времени), электроника уже сегодня сможет дать ответ на извечный вопрос: одинок ли человек во Вселенной?

ЛИТЕРАТУРА

1. Struve O., Stellar Evolution, Princeton, N. Y., 1950, Ch. 2. (Русский перевод: Струве О., Эволюция звезд, М., 1955.)
2. Alfvén H., Origin of the Solar System, N. Y., 1954.
3. Kuiper G. P., in J. A. Hynek (ed.), Astrophysics, N. Y., 1951, Ch. 8.

4. Oort J. H., in D. J. K. O'Connell (ed.), Stellar Populations, Amsterdam, 1958, p. 415.
5. Sagan C., Radiation Res., 15, 174 (1961).
6. Oparin A. J. et al. (eds.), The Origin of Life on the Earth, London, 1959.
7. Ko H. C., Proc. I. R. E., 46, 208 (1958).
8. Jansky K. G., Proc. I. R. E., 21, 1387 (1933).
9. Piddington J. H., Mont. Not. Roy. Astron. Soc., 3 (1951).
10. Strandberg M. W. P., Phys. Rev., 106, 453 (1961).
11. Hogg D. C., J. Appl. Phys., 30, 1417 (1959).
12. Schwartz R. N., Townes C. H., Nature, 190, 205 (1961).
13. Cocconi G., Morrison P., Nature, 184, 844 (1959). (См. настоящий сборник, стр. 177—182.)
14. Частное сообщение членам «The Order of the Dolphin».

А. Дж. У. Камерон

28 ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ СООБЩЕНИЙ

Статьи, собранные в этой книге, представляют собой серьезное начало изучения вероятности существования разумных биологических видов в нашей Галактике и возможности связи с ними. Несомненно, с течением времени появятся принципиально новые идеи в этой области исследований. Однако уже сейчас проблема кажется поставленной достаточно четко, чтобы мы могли сделать ряд количественных оценок соответствующих возможностей.

Вероятно, одной из причин столь быстрого роста научных спекуляций, появляющихся в этой области, является то, что до самого последнего времени ей не хватало основательности. Моррисон еще до опубликования своей пионерской работы [1], написанной совместно с Коккони, указывал, что несколько его коллег глубоко интересовались этой проблемой и высказали ряд идей. Эти идеи также представлены в данной книге. Работа Коккони — Моррисона положила начало научному подходу к рассматриваемой проблеме. Для более серьезного научного обоснования существенно, чтобы дальнейшие исследования базировались на солидном фактическом фундаменте.

Моррисон отмечает [1], что, вероятно, через несколько лет станет возможным присуждение ученой степени за исследования в этой области. Это замечательно для предмета, имеющего практически нулевое количество непосредственных данных. Для обсуждения проблемы уже

собиралась небольшая научная конференция. Эта конференция была исключительно широкой по профилю, и тем не менее участники конференции остро ощущали отсутствие экспертов по вопросам социологии, этики и лингвистики.

Это наглядно указывает на одну из наиболее важных особенностей проблемы межзвездных сообщений. Эта проблема требует привлечения всех наших знаний о природе человека, об обществе, об окружающих условиях. Следовательно, прогресс во всех областях науки дает существенный вклад в дело изучения природы внеземных обществ. Однако определенные области исследований касаются этой проблемы наиболее непосредственно, и именно на обсуждении некоторых из них я остановлюсь.

Напишем прежде всего выражение для числа мест в нашей Галактике, где можно предположить существование технически развитых и способных к общению внеземных социальных структур. Это число выражается следующим образом:

$$N = \frac{N_s f_p n_e f_b n_i f_c L_c}{L_p};$$

здесь

N_s — число подходящих звезд в Галактике;

f_p — доля таких звезд, обладающих планетными системами;

n_e — число планет земного типа, способных поддерживать жизнь;

f_b — вероятность того, что на планете будут развиваться живые биологические системы;

n_i — число биологических видов, способных создать на планете потенциальную возможность межзвездной связи;

f_c — та часть существующих биологических видов, которая стремится к попытке межзвездной связи;

L_c — продолжительность фазы, в течение которой существующие виды способны к общению;

L_p — та часть продолжительности жизни планеты, в течение которой на ней могут существовать эти биологические виды.

Написанное выше соотношение было использовано Моррисоном [1]. На Конференции по внеземной разумной

жизни, происходившей 1—2 ноября 1961 г. в Грин Бэнк, обсуждалось соотношение, подобное этому. Рассмотрим каждый член этого равенства.

Величина N_s может быть в дальнейшем подразделена на отдельные вероятности. Под подходящей звездой мы подразумеваем звезду, время пребывания которой на главной последовательности достаточно продолжительно для развития на ней разумного общества. Для солнечной системы период биологического развития занял 4,5 миллиарда лет. Для других планет этот период может отличаться вдвое. Однако звезды спектральных классов O, B, A и ранние звезды класса F, по-видимому, являются неподходящими.

Кроме того, мы должны исключить как непригодные большинство звезд, входящих в двойные системы. Более ранние исследования Су-Шу Хуанга показали, что у двойных звезд сильно уменьшена вероятность существования зоны жизни, в которой орбиты планет являются стабильными. Таким образом, остается рассматривать как подходящие лишь около 20% звезд со спектральными классами, более поздними, чем середина класса F.

Относительно того, следует ли исключить также слабые красные звезды, существуют противоположные мнения. Су-Шу Хуанг полагал, что малый размер зоны жизни вокруг таких звезд делает маловероятным наличие здесь подходящим образом расположенных планет. С другой стороны, я полагал, что число планет, находящихся в зоне жизни, сохраняется приблизительно постоянным вплоть до звезд поздних спектральных классов. Практически это значит до звезд с массой порядка 0,08 солнечной массы. Кумар показал недавно, что в звездах еще меньшей массы не начинается превращение водорода в гелий в центральной области звезды, и в результате этого они охлаждаются за время, малое по сравнению с периодом биологической эволюции.

Если мы будем рассматривать звезды со спектральными классами, не слишком отличающимися от солнечного, то, используя функцию светимости согласно Лимберу [2] и принимая массу Галактики равной $1{,}6 \cdot 10^{11}\ M_\odot$ [3], получим $N_s \approx 6 \cdot 10^9$ звезд. С другой стороны, если мы включим также и слабые звезды, то будем иметь $N_s \approx$

$\approx 4 \cdot 10^{10}$ звезд. Делая эти оценки, мы исключили двойные системы (все звезды-«кандидаты» являются одиночными звездами).

Рассмотрим теперь величину f_p — долю звезд, обладающих планетными системами. Чтобы достаточно уверенно определить эту величину, мы должны иметь удовлетворительную теорию образования планетных систем. Однако проблема происхождения нашей собственной солнечной системы является основной нерешенной проблемой науки в течение более чем трех столетий. С этой проблемой связан ряд сложных химических и физических процессов, поэтому маловероятно, что мы получим исчерпывающий ответ в ближайшие несколько лет. В настоящее время наметился прогресс в понимании процесса образования звезд, в понимании того, что́ происходит с моментом количества движения межзвездного вещества при звездообразовании, в изучении физических и химических процессов в метеоритах. Исследуя Луну и ближайшие планеты, мы можем надеяться, что в течение нескольких лет наши представления об образовании и начальном развитии солнечной системы станут более полными. Мне кажется, что следует принять $f_p = 1$; другие, возможно, выбрали бы меньшее значение.

Как много планет в каждой планетной системе приспособлено для зарождения жизни? Это зависит от двух основных вопросов: сколько планет находится внутри зоны жизни и как они велики? Чтобы ответить на эти вопросы, мы должны гораздо более ясно представлять себе детали образования планетных систем. В солнечной системе в зоне жизни находятся, вероятно, 2 планеты, а в разд. 10 я показал, что в зоне жизни звезды любого типа должны находиться в среднем 1,4 планеты. Совсем другое дело — распределение планет по размерам. В разд. 3 я показал, что размеры планет, по-видимому, должны быть очень разнообразны. Поскольку это касается поддержания жизни, наибольшее значение приобретает условие, чтобы планеты были достаточно велики для удержания подходящей атмосферы; верхний предел размеров планет не определяется столь четко. Пройдет некоторое время, пока мы представим себе физические характеристики Венеры и Марса достаточно хорошо, чтоб почувствовать, что можем дать количественный ответ на эти вопросы с высокой степенью точности. Я полагаю пока, что $n_e = 0{,}3$.

Возможно, в дальнейшем мы получим непосредственные наблюдательные данные о размерах планет. Некоторые близкие звезды имеют невидимых спутников с массой, большей, чем масса Юпитера. Эти спутники были открыты по возмущающему действию на орбиты основных звезд. Без всякого сомнения, используя более мощные астрографы и современные вычислительные методы обработки огромного объема необходимых данных, можно будет заметить и меньшие возмущения. В принципе можно было бы обнаружить очень слабые затмения звезды планетами, но маловероятно, чтобы это была плодотворная возможность.

Большинство биологов сегодня скажут, что вероятность биогенеза равна единице, если планета напоминает первобытную Землю с атмосферой другого состава. Калвин рассмотрел процессы биогенезиса в главе 5. Исследование этих биохимических процессов быстро идет вперед, и, вероятно, в ближайшие несколько лет будут заполнены многие из оставшихся пробелов в наших знаниях о жизни. Однако еще остается ряд интересных вопросов, которые следует обсудить. Представим себе подходящую планету в зоне обитаемости слабой красной звезды. Что́ произойдет на ней в тот момент биологической эволюции, когда в растениях должен начаться фотосинтез, чтобы использовать энергию света звезды? Будут ли растения вынуждены довольствоваться сильно ослабленным светом в голубой и желтой областях спектра или начнутся какие-то новые процессы, позволяющие использовать значительно преобладающее инфракрасное излучение? Несмотря на то, что существует много вопросов такого рода, я склонен считать, что $f_b = 1$. Если мы обнаружим, что жизнь возникла и на Марсе, наша уверенность сильно возрастет.

Относительно n_i, числа биологических видов, способных осуществлять межзвездную сигнализацию, наши знания очень неопределенны. Для Земли это число равно по крайней мере единице. Очень интересно поставить вопрос: могут ли другие существующие на Земле биологические виды развить технологическую культуру? Лилли нашел, что дельфины обладают неким сложным «языком» и про-

являют значительную степень разумности. Но могут ли дельфины, предоставленные самим себе, развить технику, не имея рук? И могут ли они заниматься космическими исследованиями, живя в воде? Некоторые думают, что дельфины и другие виды могут создать технологически развитое общество и что это только вопрос времени. В то же время может быть, что на Марсе ни один вид никогда не создаст технологически развитого общества. Поэтому я буду предполагать, что $n_i = 1$.

Обратимся теперь к величине f_c — доле технически развитых цивилизаций, желающих сделать попытку межзвездной связи. Можно предполагать, что эта доля должна быть довольно большой. Кажется вполне вероятным, что развитие техники предусматривает значительную степень любознательности. Эта особенность заставляет думать, что общество, по-видимому, попытается осуществить межзвездную связь сразу же, как только оно придет к мысли о возможности широкого распространения технологически развитых цивилизаций в Галактике. Разумеется, эта проблема заслуживает гораздо более глубокого изучения. Я полагаю, что $f_c = 0{,}5$.

Наибольшая неуверенность, как подчеркивается Хорнером в главе 26, связана с продолжительностью жизни технически развитого общества после достижения им уровня, при котором возможна межзвездная связь. В это же самое время, по-видимому, общество достигнет и возможности совершить самоубийство. Некоторые пессимисты утверждают, что мы имеем атомную бомбу уже в течение 10 лет и что, быть может, продолжительность жизни нашего общества следует отсчитывать от момента создания атомной бомбы. Так ли это даже при условии термоядерной войны, остается до некоторой степени открытым вопросом. Однако, может быть, мы уже перенесли первый большой кризис термоядерной эры. Годами издатели Бюллетеня ученых-атомщиков изображали на обложке часы со стрелками, все ближе и ближе придвигающимися к роковому двенадцатому часу. Это должно изображать время, оставшееся до начала ядерной катастрофы. Недавно стрелки начали двигаться назад.

Если культура сумеет выжить во время ядерной войны или избежать термоядерного разрушения, то как долго

она будет распознаваема как культура? Наибольший опыт в этом отношении мы имеем в случае китайской культуры, сохранившейся в течение тысячелетий. За это время происходила внутренняя борьба, однако она оставалась непрерывной культурой в смысле преемственности. Но китайская культура существовала среди многих культур на планете, которые непрерывно подавляли и вытесняли одна другую. Единая культура на всей планете, к которой мы, по-видимому, постепенно идем, может просуществовать гораздо дольше. Как долго? Биологические виды развиваются за время порядка миллиона лет. Континенты изменяются за время порядка миллиарда лет. Хорнер предполагает, что очень важный эффект обратной связи, существующий при межзвездных сообщениях, может значительно продлить жизнь культуры. Однако основные направления развития культуры изменяются, и общество может потерять интерес к межзвездным связям. В этом вопросе мы сталкиваемся с самыми большими неопределенностями. Я полагаю $L_c = 10^6$ лет. Хорнер делает в главе 26 более сложные и более пессимистические предположения.

Величину L_p, продолжительность жизни планеты после появления на ней разумной жизни, мы должны принять равной нескольким миллиардам лет. Возраст Галактики составляет примерно 10^{10} лет, и бóльшая часть звезд образовалась в первые несколько миллиардов лет истории Галактики. Поэтому я принимаю $L_p = 3 \cdot 10^9$ лет.

Таким образом, мои оценки вероятностей различных факторов дают

$$N = 4 \cdot 10^{10} \cdot 1 \cdot 0{,}3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}5 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^9 = 2 \cdot 10^6.$$

Это внушительное число высокоразвитых цивилизаций.

Найдем теперь расстояние до ближайших цивилизаций. В окрестностях Солнца пространственная плотность звезд, которые я рассматривал как пригодные для жизни, равняется приблизительно 0,03 звезды на кубический парсек. Следовательно, пространственная плотность способных к общению цивилизаций равна $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ цивилизаций на кубический парсек. Таким образом, мы можем ожидать, что ближайшие к нам цивилизации находятся на расстоянии около 87 *парсек* (или 284 световых лет). Это расстояние получилось несколько меньшим, чем

по оценке Хорнера. Однако следует иметь в виду, что все эти оценки крайне ненадежны.

Несомненно, имеется обширное поле для исследований во многих отраслях знаний, направленных на то, чтобы совершенствовать наши предположения относительно вероятности вышеупомянутых факторов. Основное направление исследований лежит, очевидно, в области социальных наук, которые должны определить критическую величину L_c.

Следует также лучше изучить технику связи. В этой книге были сделаны разнообразные предположения о сравнительных достоинствах передачи сигналов с помощью радиоволн и света различной частоты. Мы должны шире использовать логику, чтобы определить, в какой именно области спектра следует ожидать межзвездные сообщения. Сейчас дискуссия сосредоточена вокруг концепции сигналов контакта, которые укажут нам, где следует искать этот узкий канал связи. Я думаю, что здесь логика может помочь нам намного больше, чем до сих пор. Но при этом следует все время заботиться об универсальности тех логических процессов, которые мы используем.

Мне хотелось бы добавить к дискуссии о технике связи только некоторые соображения относительно связи с цивилизациями, находящимися на планетах вблизи очень слабых звезд. В разд. 10 я показал, что существование таких цивилизаций вполне вероятно. Очевидным методом связи у этих цивилизаций могут быть лазеры, поскольку отношение сигнала к шуму оптических передач для них должно быть на порядок выше, чем вычисленное в разд. 23 Шварцем и Таунсом для Солнца. Наиболее логично осуществлять передачу в водородной линии $H\alpha$ благодаря ее универсальности в том смысле, что она присутствует как линия поглощения в звездах всех спектральных типов и является характеристикой самого распространенного элемента во Вселенной.

По поводу наилучшей формы передачи межзвездных сообщений высказываются различные соображения. Эти формы разнообразны — от простой передачи математических рядов, таких, как ряд простых чисел, до полного курса лингвистики с последующей передачей энциклопедии. В этой области могут быть полезны дальнейшие исследования.

Недавно Фрейденталь [4] опубликовал книгу под названием «Линкос (Построение языка для космического общения)». В ней он попытался дать проект космической лингвистики, положив в основу описание абстрактных математических соотношений. Он показал, что словесное описание такого характера является более приемлемым, чем передача телевизионных картин, поскольку мы не можем сообщить приемнику принципы разложения сигналов в картину. Однако в правильности этого утверждения можно сомневаться по двум причинам.

1. Слушатель должен сделать весьма сложную цепь более или менее правильных логических рассуждений, чтобы понять словесные описания. Приходится беспокоиться о том, что слушатель может пропустить начало и будет введен в заблуждение. Приходится беспокоиться также о степени «остаточной антропологичности» в построении космического языка.

2. В главе 27 мы видели, как Оливер легко сумел построить телевизионное изображение из серии сигналов типа включение — выключение и как он получил полноценную информацию из этой картины, несмотря на то, что количество информации было близко к уровню насыщения. (Очевидно, что реальные межзвездные сигналы должны изображать картину значительно более ясно за счет посылки большего числа знаков.) Многие успешно расшифровали эту картину, а также и другие «межзвездные сообщения», посланные Дрейком.

На этом основании кажется вполне вероятным, что телевизионная картина может быть логическим методом для открытия межзвездных переговоров. Но этот вопрос должен быть тщательно продуман.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morrison P., Lecture at the Institute for Space Studies, Dec. 14, 1961.
2. Limber D. N., Astrophys. J., 131, 168 (1960).
3. Allen C. W., Astrophysical Quantities, London, 1955. (Русский перевод: Аллен К. У., Астрофизические величины, М., 1960.)
4. Freudenthal H., Lincos: Design of a Language for Cosmic Intercourse, Amsterdam, 1960.

Ф. Моррисон

29 ПЕРСПЕКТИВЫ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СВЯЗИ

В течение немногих лет, с тех пор как тема межзвездной связи перешла из научно-фантастических журналов в научные, появилась основная часть работ, очень хорошо представленных в этом интересном сборнике под редакцией д-ра Камерона. Возможно, самой поразительной чертой этих работ является хорошее согласие различных авторов. Это, конечно, благоприятный знак; в то же время было бы неправильно игнорировать тот факт, что сам акт публикации в таком спекулятивном тоне предполагает такой оборот мысли, который может ввести в заблуждение. Более осторожные писатели склоняются к поискам агностической позиции: «Я считаю. . . самопроизвольное образование. . . первое живое существо. . . чрезвычайно неправдоподобно. . . *но*. . . мы, конечно, не имеем всех необходимых фактов. Невозможно в настоящее время составить определенное мнение по этому вопросу». Так гласит недавнее заявление весьма авторитетного биохимика [1], одного из тех, кто в течение пятнадцати лет занимается проблемой происхождения жизни.

Характерно, что чем сложнее процесс, тем меньше мы его понимаем. Излучение звезд достаточно просто, но образование планет, происхождение жизни, эволюция сложных существ, их техническое развитие и, самое главное, долговечность обществ разумных существ являются вопросами, для которых нет надежной теории. В некоторых случаях она кажется правдоподобной, но никогда не следует

брать в советчики наш ограниченный человеческий опыт. Например, в вопросе образования планет кажется естественным ограничиться рассмотрением планет с размерами орбит порядка земной, однако можно привести доводы в пользу закона распределения, более похожего на логарифмическое распределение орбит в солнечной системе. Это расширит число пригодных для жизни планет, так как позволит предположить, что они существуют около звезд, которые намного меньше и холоднее Солнца. Этот аргумент может быть противопоставлен несомненной тенденции оптимистически оценивать малонадежные факторы.

Вопрос об оптимальных каналах связи до сих пор является ключевым. Возможности новых оптических мазеров привлекательны, но они, по-видимому, не улучшают преимущества низкого отношения сигнала к шуму, присущего дециметровым волнам, которые мало излучаются в природе на галактических расстояниях. Здесь, однако, требуется особое внимание к тому факту, что проблема связи имеет две различные стадии: стадию поисков и находок и стадию передачи большого объема информации. Здесь все требует детального изучения; проблема существования предполагаемых источников, связь по многим каналам и разделение времени между ними еще только затронуты и ждут более пристального изучения. Строгое решение этой проблемы может еще более прояснить рациональный выбор канала.

Наконец, главный смысл всех этих исследований — это, конечно, сделать возможным экспериментальное подтверждение всех заманчивых рассуждений. Первых успехов можно ожидать в 1965—1966 гг., когда мягко посаженные на Марс зонды смогут дать ответ — есть ли жизнь на этой планете. Если ответ будет положительным, как полагают сейчас многие, следующим этапом будет, конечно, определение того, обладает ли эта форма жизни признаками независимого от земных форм жизни происхождения. Если ответ на этот вопрос также будет утвердительным, мнение, что жизнь — только случайное явление, уступит место мнению, что жизнь — явление закономерное. Аналогичная работа в других малоисследованных областях, от изучения невидимых спутников звезд до исторических исследований источников технического про-

гресса, должна заменить чисто кабинетный характер статей, представленных в первом сборнике, посвященном этой проблеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Horowitz N. H., Proc. Federation Exptl. Biol., 21, 687 (1962).
2. Cameron A. G. W. (См. главу 10 настоящего сборника.)
3. Handelsman M., Wescon Report, 4.4, Aug. 1962. (См. главу 21 настоящего сборника.)

СОДЕРЖАНИЕ

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ

Редактор *В. С. Бассоло*
Художник *И. Кревцов*
Художественный редактор *Н. Фильчагина*
Технический редактор *А. Грушин*
Корректор *Е. В. Кочегарова*

Сдано в производство 20/I 1965 г. Подписано к печати 4/VI 1965 г.
Бумага 84×108 1/32=5,07 бум. л. 17,01 печ. л. Уч.-изд. л. 15,27.
Изд. № 27/3212 Цена 1 р. 29 к. Зак. 826

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Московская типография № 16 Главполиграфпрома Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Москва, Трехпрудный пер., д. 9

ИЗДАТЕЛЬСТВО
„МИР"



МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СВЯЗЬ

